

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique

Laboratoire de Commande des Processus

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique

---

# Étude et Automatisation de la station PCS Compacte "FESTO"

---

Mohamed Amine BENALLEL  
Abderrahmane BARKAT

Sous la direction de  
Mr. E.M. BERKOUK Professeur  
Mr. R. ILLOUL MCA

Présenté et soutenu publiquement le 19/06/2016

## Composition du Jury :

Président	Mr. O. STIHI	Maître Assistant A	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	Mr. M. BERKOUK	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
	Mr. R. ILLOUL	MCA	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Mr. L. ABDELOUEL	Maître Assistant A	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2016



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique

Laboratoire de Commande des Processus

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique

---

# Étude et Automatisation de la station PCS Compacte "FESTO"

---

Mohamed Amine BENALLEL  
Abderrahmane BARKAT

Sous la direction de  
Mr. E.M. BERKOUK Professeur  
Mr. R. ILLOUL MCA

Présenté et soutenu publiquement le 19/06/2016

## Composition du Jury :

Président	Mr. O. STIHI	Maître Assistant A	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	Mr. M. BERKOUK	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
	Mr. R. ILLOUL	MCA	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Mr. L. ABDELOUEL	Maître Assistant A	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2016

## ملخص:

العمل المقدم في هذه المذكرة يسمح بالتأقلم مع التحكم الآلي في بيئة صناعية. في الواقع، تم تصميم محطة تحكم فيستو للإجابة على عدد من متطلبات التدريب المهني. هذا المشروع يسعى لاستعمال مسير صناعي مبرمج "سيمنس" لإدارة وتحديد والتعليق على مختلف الأنظمة الفرعية المكونة للتركيب باستخدام البرمجيات ستاب 7 و وينسيبي.

كلمات مفتاحية:

مسير صناعي مبرمج "سيمنس"، ستاب 7، وينسيبي، أجهزة الاستشعار، المشغلات، التحديد، الأرشفة، التحكم المتقدم.

## Abstract :

The work presented in this paper allows to get acquainted with automation in an industrial environment. Indeed, the Festo Control Station is designed to satisfy a number of vocational training requirement. This project involves manipulating a SIEMENS programmable logic controller to manage, identify and control the various subsystems constituting the installation using two software, STEP 7 and WinCC.

## Keywords :

Programmable logic controller SIEMENS, STEP 7, WinCC, sensors, actuators, identification, archiving, advanced control.

## Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire permet de se familiariser avec l'automatisation dans un milieu industriel. En effet, la station de contrôle FESTO est conçu pour répondre à un certain nombre d'exigence de formation professionnelle. Ce projet consiste donc à manipuler un automate SIEMENS afin de gérer, identifier et commander les différents sous-systèmes constituant l'installation à l'aide des logiciels STEP 7 et WinCC.

## Mots clés :

Automate Programmable Industriel SIEMENS, STEP 7, WinCC, capteurs, actionneurs, identification, archivage, commande avancée.

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes chers parents qui m'ont éclairé mon chemin et qui m'ont encouragé et*

*soutenu tout au long de ma vie,*

*À la mémoire de mes deux grands-mères et celle de mon oncle,*

*À ma sœur Amina,*

*À mes frères Mohammed et Ahmed*

*À mon binôme Amine, qui est avant tout un très bon ami.*

*À mes chers amis : Housseem, Islem, Otmane, Wassim, ... Qui m'ont encouragé et qui*

*été toujours présents à mes côtés dans le meilleur comme dans le pire.*

*À tous mes camarades de la promotion avec qui j'ai passé des moments inoubliables.*

*Et à vous chers lecteurs.*

**Abderrahmane**

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à ma mère et mon père pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué, avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance. A mes chers frères Samir, Brahim et Mahdi auxquels je dois beaucoup de respect. A ma sœur Souad qui compte beaucoup pour moi. A mes amis proche Ilies, Imad, Islam, Walid, Nasri, Anes, Yasser, Oussama et Hakim qui ont su être là à chaque moment difficile. A mes camarades de promo qui ont su faire de mes séjours à l'école nationale polytechnique un moment très profitable. Et enfin à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin....

**Amine**

# Remerciements

Tous d'abord on remercie Dieu de nous avoir accordé la connaissance, donner le courage, la patience et la santé pour réaliser notre projet de fin d'étude.

Toute notre gratitude à nos parents pour leur soutien indéfectible.

En particulier l'expression de notre grande reconnaissance à Monsieur E-M. BERKOUK et Monsieur R. ILLOUL pour leur confiance qu'ils nous ont accordé en acceptant de nous encadrer, la pertinence de leurs conseils, leurs soutiens, leurs disponibilités pour répondre à nos questions et à nos attentes et pour l'attention qu'ils nous ont apporté durant l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier les membres de jury Monsieur Omar STIHI et Monsieur Lahcene ABDELLOUEL d'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Nous remercions enfin fortement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale..... 14

Chapitre I Système didactique de contrôle de processus « FESTO »..... 15

I.1	Introduction.....	15
I.2	Présentation du système.....	15
I.2.1	Élément de contrôle.....	16
I.2.2	Terminal d'entrées/sorties.....	16
I.2.3	Terminal de conversion.....	17
I.2.4	Installation.....	18
I.3	Fonction des composants de base.....	20
I.3.1	Pompe.....	20
I.3.2	Vanne à bille.....	20
I.3.3	Éléments de contrôle de niveau tout ou rien.....	21
I.3.4	Vanne proportionnelle.....	23
I.3.5	Capteur ultrasonique de niveau.....	23
I.3.6	Capteur fréquentiel de débit.....	24
I.3.7	Capteur de pression.....	24
I.3.8	Capteur de température.....	25
I.4	Connexions Automate-Station.....	27
I.4.1	Connexion API-Terminal E/S.....	28
I.4.2	Connexion API-Panneau de contrôle.....	29
I.4.3	Connexion API-Unité d'alimentation.....	30
I.4.4	Connexion API-PC.....	30

I.5	Conclusion .....	32
<b>Chapitre II</b>	<b>Identification et régulation PID.....</b>	<b>33</b>
II.1	Introduction.....	33
II.2	Identification des systèmes .....	33
II.2.1	Principe de l'identification .....	33
II.2.2	Identification avec Matlab .....	35
II.3	Régulation des systèmes de contrôle de l'installation .....	38
II.3.1	Système de régulation du niveau .....	38
II.3.2	Système de régulation de débit.....	43
II.3.3	Système de régulation de pression.....	50
II.3.4	Système de régulation de température.....	56
II.4	Conclusion .....	58
<b>Chapitre III</b>	<b>Commande Robuste .....</b>	<b>59</b>
III.1	Introduction .....	59
III.2	Développement de la loi de commande par mode glissant .....	59
III.3	Développement de la loi de commande par Backstepping .....	67
III.4	Conclusion.....	69
<b>Chapitre IV</b>	<b>Application.....</b>	<b>70</b>
IV.1	Introduction .....	70
IV.2	Présentation des logiciels .....	70
IV.2.1	Qu'est-ce que STEP7 .....	70
IV.2.2	Qu'est-ce que WinCC flexible .....	71
IV.2.3	Exemple d'illustration .....	72
IV.3	Programmation avec STEP7 .....	77
IV.3.1	Organisation du projet .....	77
IV.3.2	Blocs de programmation.....	81
IV.4	Description de l'interface WinCC.....	83
IV.4.1	Vue principale.....	83
IV.4.2	Les vues des réglages .....	84
IV.4.3	La vue des alarmes .....	86
IV.5	Conclusion.....	87

Conclusion générale .....	88
Bibliographie .....	89
Annexes .....	91

# Liste des tableaux

Tableau I-1 Composants de l'installation et leurs identifiants .....	19
Tableau I-2 Caractéristiques techniques de l'installation.....	25
Tableau I-3 Adressage correspondant au terminal des E/S analogiques .....	28
Tableau I-4 Adressage correspondant au terminal des E/S binaires .....	29
Tableau I-5 Tableau d'adressage des entrées binaires.....	30
Tableau I-6 Tableau d'adressage des sorties binaires .....	31
Tableau I-7 Tableau d'adressage des entrées/sorties analogiques.....	31
Tableau IV-1 Configuration des variables pour chaque régulation.....	82

# Liste des figures

Figure I.1 Maquette didactique FESTO .....	16
Figure I.2 Terminal d'entrées/sorties analogiques X2.....	17
Figure I.3 Terminal d'entrées/sorties binaires XMA1.....	17
Figure I.4 Diagramme synoptique de l'installation didactique FESTO .....	18
Figure I.5 Pompe centrifuge .....	20
Figure I.6 Processus de la vanne à bille.....	21
Figure I.7 Détecteurs de proximité capacitifs.....	21
Figure I.8 Flotteur de sécurité anti débordement.....	22
Figure I.9 Flotteur pour la détection des seuils de remplissage.....	22
Figure I.10 Vanne proportionnelle .....	23
Figure I.11 Capteur ultrasonique de niveau.....	23
Figure I.12 Capteur fréquentiel de débit.....	24
Figure I.13 Capteur de pression.....	25
Figure I.14 Capteur de température .....	25
Figure I.15 Connexions entre la station de travail et l'API.....	27
Figure I.16 Schéma du terminal des E/S analogiques .....	28
Figure I.17 Schéma du terminal des E/S binaires.....	29
Figure II.1 Principe de l'identification d'un système .....	34
Figure II.2 Procédure d'identification d'un système .....	35
Figure II.3 Interface graphique de l'outil Ident .....	36
Figure II.4 Fenêtre d'importation de données .....	37
Figure II.5 Fenêtre d'estimation des paramètres du « Transfert Function model » .....	37
Figure II.6 Visualisation des sorties des modèles de validation avec « Model output ».....	38
Figure II.7 Circuit relatif à la régulation du niveau .....	39
Figure II.8 Diagramme électrique de principe de la régulation de niveau analogique.....	39
Figure II.9 Validation de l'identification avec un système de 1 <sup>ier</sup> ordre .....	40
Figure II.10 Validation de l'identification avec un système de 2 <sup>nd</sup> ordre.....	41
Figure II.11 Réponse indicielle du système de contrôle de niveau en BO .....	41
Figure II.12 Réponse indicielle du système de niveau réel en boucle fermée.....	42
Figure II.13 Circuit relatif à la régulation de débit avec la pompe.....	43

Figure II.14 Diagramme électrique de la régulation de débit avec la pompe.....	44
Figure II.15 Validation de l'identification de système de contrôle de débit-pompe .....	45
Figure II.16 Réponse indicielle du système débit-pompe en boucle ouverte.....	45
Figure II.17 Réponse indicielle du système réel débit-pompe en boucle ouverte.....	46
Figure II.18 Circuit relatif à la régulation de débit avec la vanne proportionnelle .....	47
Figure II.19 Diagramme électrique de la régulation du système débit-vanne.....	47
Figure II.20 Validation de l'identification du système de contrôle débit-vanne.....	48
Figure II.21 Réponse indicielle du débit réelle (vanne) en boucle ouverte.....	48
Figure II.22 Réponse indicielle du système réel débit-vanne en boucle fermée .....	49
Figure II.23 Circuit relatif à la régulation de pression avec la pompe comme contrôleur .....	50
Figure II.24 Diagramme électrique de principe de la régulation de pression avec la pompe .....	51
Figure II.25 Réponse indicielle critique du système réel pression-pompe.....	51
Figure II.26 Réponse indicielle du système réel de pression-pompe en boucle fermée.....	52
Figure II.27 Circuit relatif à la régulation de pression avec la vanne comme contrôleur .....	53
Figure II.28 Diagramme électrique de principe de la régulation de pression-vanne.....	54
Figure II.29 Validation de l'identification du système de contrôle pression-vanne.....	54
Figure II.30 Réponse indicielle du système pression-vanne en boucle ouverte.....	55
Figure II.31 Réponse indicielle du système réel pression-vanne en boucle fermée.....	56
Figure II.32 Circuit relatif à la régulation de température.....	57
Figure II.33 Diagramme électrique de principe de la régulation de température.....	57
Figure II.34 Réponse du système de contrôle de température en BF.....	58
Figure III.1 Commande du système de contrôle de niveau par mode glissant.....	62
Figure III.2 Commande lissée du système de contrôle de niveau par mode glissant .....	63
Figure III.3 Commande finale du système de contrôle de niveau par mode glissant.....	64
Figure III.4 Réponse du système de contrôle débit-pompe (mode glissant) .....	65
Figure III.5 Réponse du système de contrôle débit-vanne (mode glissant).....	66
Figure III.6 Réponse du système de contrôle pression-vanne (mode glissant) .....	67
Figure III.7 Réponse du système de contrôle de niveau (Backstepping) .....	68
Figure III.8 Réponse du système de contrôle de pression-vanne (Backstepping).....	69
Figure IV.1 Communication entre le WinCC, l'API et le processus .....	71
Figure IV.2 Configuration matérielle de l'exemple .....	72
Figure IV.3 Paramétrage des entrées sorties analogiques .....	73
Figure IV.4 Table des mnémoniques correspondant à l'exemple.....	73

Figure IV.5 Paramétrage de la fonction FC105.....	74
Figure IV.6 Paramétrage de la fonction FC106.....	74
Figure IV.7 Réponse indicielle du système de contrôle de niveau en BO .....	75
Figure IV.8 Sélection d'un OB35 .....	75
Figure IV.9 Fonction bloc généré à partir du code SCL .....	76
Figure IV.10 Réponse indicielle du système de contrôle de niveau en BF .....	76
Figure IV.11 Vue de base pour la régulation de niveau .....	77
Figure IV.12 Démarrage du programme et choix de la régulation.....	78
Figure IV.13 Organigramme de la régulation de niveau .....	78
Figure IV.14 Organigramme de la régulation du système de contrôle de débit.....	79
Figure IV.15 Organigramme de la régulation du système de contrôle de pression.....	80
Figure IV.16 Organigramme de la régulation du système de contrôle de température.....	80
Figure IV.17 Vue principale.....	83
Figure IV.18 Vue relative à la régulation de niveau.....	84
Figure IV.19 Vue relative à la régulation de débit .....	85
Figure IV.20 Vue relative à la régulation de pression.....	85
Figure IV.21 Vue relative à la régulation de température .....	86
Figure IV.22 Vue d'alarme relative à un dépassement de limite de niveau .....	86

# Liste des abréviations

API	Automate Programmable Industriel
BF	Boucle Fermée
BO	Boucle Ouverte
BS	Backstepping
CPU	Central Processing Unit
DB	Data Bloc
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
FBD	Function Bloc Diagram
FC	Function
FT	Fonction de Transfert
IHM	Interface Homme-Machine
IL	Instruction List
LD	Ladder Diagram
LED	Light-Emitting Diode
MG	Mode Glissant
MPI	Multi Point Interface
OB	Organisation Bloc
PROM	Programmable Read Only Memory
PROFIBUS	PROcess FIeld BUS
PROFINET	PROcess FIeld NET
PPI	Point to Point Interface
PCS	Process Control System
PLC	Programmable Logic Controller
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SCL	Source Coupled Logic
SFC	Sequential Fonction Chart
ST	Structured Text
TOR	Tout Ou Rien

## Introduction générale

---

# Introduction générale

La compétitivité des entreprises impose un recours à la fois fréquent et intensif à des technologies de production avancées. Les critères exigés par l'industrie, ne se limite plus à l'augmentation de la productivité, l'amélioration de la qualité et la diminution des coûts de production, mais visent aussi l'amélioration des conditions de travail, l'accroissement de la sécurité et la suppression des tâches pénibles et répétitives.

L'automate programmable industriel répond aujourd'hui à ces besoins d'adaptation et de flexibilité pour un très grand nombre d'opération, ce qui fait qu'il est désormais le constituant le plus répandu pour la conception des solutions de l'automatisation Il couvre pratiquement tous les secteurs de l'industrie, ceci est due en grande partie à la puissance de son environnement de développement et aux larges possibilités d'interconnexions.

Dans le but de former ses élèves ingénieurs automaticiens à la maitrise des API, le département d'Automatique de l'Ecole Nationale Polytechnique a acquis un système d'apprentissage didactique pour l'automatisation, FESTO, conçu pour répondre à un certain nombre d'exigences de formation professionnelle.

Le but de notre travail se porte sur l'étude des différents composants (capteurs, actionneurs, convertisseurs, ...) qui constituent la station afin de proposer une solution d'automatisation pour le contrôle des systèmes présents sur l'installation avec le moyen d'un automate SIEMENS. Ce travail nécessite donc l'étude préalable de l'automate S7-313c présent dans la station ainsi que le logiciel de programmation des API Siemens STEP7 et le logiciel de conception des interfaces homme-machine, WinCC flexible.

# **Chapitre I**

## **Système didactique de contrôle de processus**

### **« FESTO » [1]**

#### **I.1 Introduction**

La station compacte FESTO est un Process Control System (PCS) développé et produit uniquement à des fins de formation professionnelle et d'autres dans le domaine de l'automatisation et de la communication.

Au cours de ce chapitre, on présentera cette station d'un point de vue instrumentation, à savoir les différents capteurs et actionneurs utilisés. Nous décrirons par la suite les différents systèmes de contrôle que constitue l'installation.

#### **I.2 Présentation du système**

Le système didactique d'apprentissage FESTO (figure I.1) est conçu pour répondre à un certain nombre de formations différentes et exigences professionnelles. La station Compact Workstation fournit un système approprié pour la formation axée sur la pratique, en effet, cette station facilite la formation professionnelle et continue orientée vers l'industrie et le matériel est didactiquement identique aux composants industriels.



**Figure I.1 Maquette didactique FESTO**

Le système d'apprentissage didactique pour l'automatisation FESTO est divisé en quatre parties principales distinctes :

- L'élément de contrôle (Automate programmable industriel SIEMENS S7-313C) ;
- Le terminal analogique d'entrées/sorties ;
- Le terminal de conversion des signaux analogique ;
- L'installation.

### **I.2.1 Élément de contrôle**

Une description détaillée de l'API S7-313C est mise en point dans le chapitre suivant qui concerne les automates programmables industriel.

### **I.2.2 Terminal d'entrées/sorties**

Ce terminal permet de relier les capteurs et actionneurs à l'API à travers un câblage SYSLINK. On distingue deux terminaux d'entrées/sorties ; terminale d'E/S analogiques X2 (figure I.2) et terminale d'E/S binaires XMA1 (figure I.3).



Figure I.2 Terminal d'entrées/sorties analogiques X2

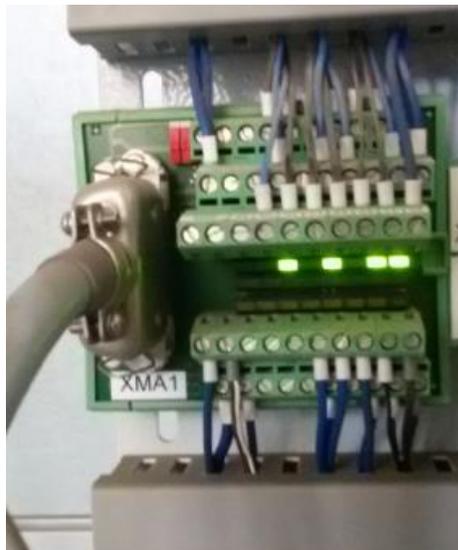


Figure I.3 Terminal d'entrées/sorties binaires XMA1

### I.2.3 Terminal de conversion

Avant d'être reliés au terminal analogique d'entrées/sorties, les différents capteurs et actionneurs passe d'abord par le terminal de conversion des signaux analogiques. Ce dernier est constitué de plusieurs convertisseurs analogiques, qui permettent, d'un côté, de convertir les signaux envoyés par les différents capteurs analogiques constituant l'installation en signaux

standard (0...10V) et d'un autre côté, de transformer les signaux analogiques envoyés par l'API vers les éléments de contrôle en signaux standards (0...10V) ou (0...24V), (voir annexe A).

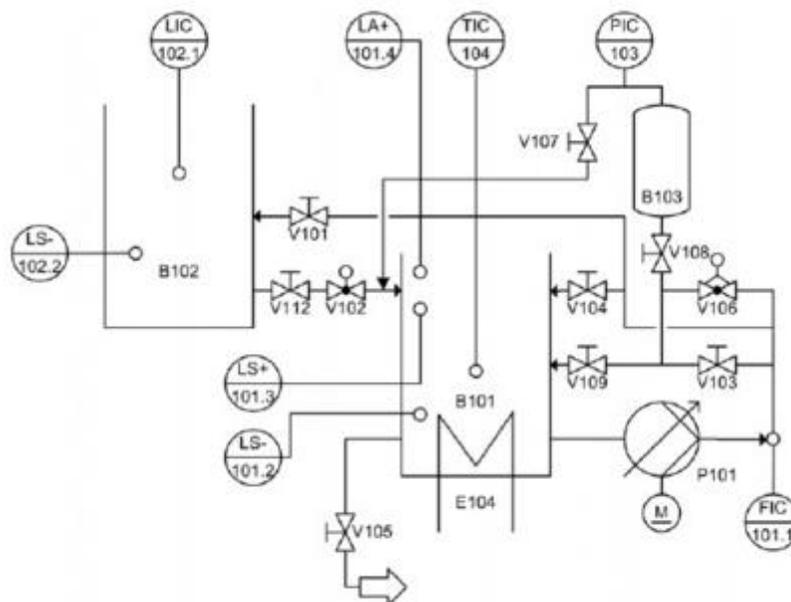
### I.2.4 Installation

Elle combine quatre systèmes en boucle fermé qu'on va réguler par la suite et qui sont :

- Système de contrôle de niveau ;
- Système de contrôle de débit ;
- Système de contrôle de pression ;
- Système de contrôle de température.

Le choix de la boucle de régulation se fait par une combinaison bien précise des vannes présentes sur la station (voir tableau dans l'annexe B).

La figure I.4 montre le diagramme synoptique complet de l'installation.



**Figure I.4 Diagramme synoptique de l'installation didactique FESTO**

Les composants de base constituant l'installation et figurant dans le diagramme ci-dessus sont illustrés dans le tableau suivant :

**Tableau I-1 Composants de l'installation et leurs identifiants**

<b>Composant</b>	<b>Identifiant</b>
Deux réservoirs de liquide	B101 et B102
Réservoir de pression	B103
Capteur de niveau ultrasonique	LIC102.1
Capteur de débit fréquentiel	FIC101.1
Capteur de pression piézorésistif	PIC103
Capteur de température pt100	TIC104
Deux détecteurs de proximité capacitifs	LS-101.2 et LS+101+3
Flotteur électromécanique de seuil dans le réservoir B102	LS-102.2
Flotteur anti-débordement dans le réservoir B101	LA+101.4
Pompe centrifuge	P101
Moteur de contrôle pour la pompe	M1
Vanne proportionnelle avec un module de contrôle électronique	V106
Système de chauffage avec un relai de contrôle intégré	E104
Processus de vanne à bille avec un entraînement rotatif pneumatique type (SYPAR)	V102
Vannes manuelles	V101, V103, V104, V107, V108, V109 et V112
Robinet de vidange	V105

Ainsi que le reste des composants :

- Unité de service pneumatique ;
- Jauge de pression 0...1bar ;
- Support de montage ;
- Panneau de contrôle ;
- API SIEMENS S7-313C ;
- Terminal d'entrées/sorties ;
- Terminal des signaux analogiques ;
- Convertisseurs de signaux : courant/tension, fréquence/tension, PT100/tension.

### I.3 Fonction des composants de base

#### I.3.1 Pompe

La pompe centrifuge P101 (1) est l'élément de contrôle (actionneur) commun à toutes les boucles de régulation. Elle permet de délivrer le fluide (eau) du réservoir B101 à travers les différents systèmes de canalisation.



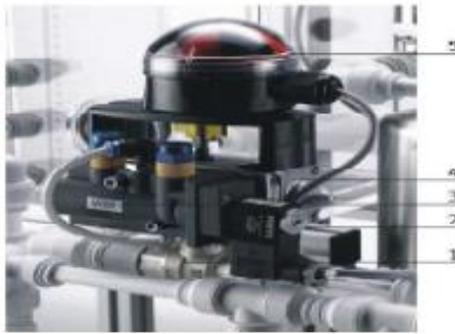
**Figure I.5 Pompe centrifuge**

La pompe ne doit en aucune façon fonctionner à sec, et avant tout démarrage toutes les canalisations menant à elle doivent être remplies d'eau. Elle est entraînée par un moteur de contrôle A4 ; un relais K1 connecté comme sortie binaire (O2 dans le XMA1) permet de choisir le mode de fonctionnement de la pompe. Si la sortie O2 est mise à 1, une sortie binaire additionnelle (O3 dans XMA1) permettra le démarrage et l'arrêt de la pompe, dans ce mode de fonctionnement la pompe fonctionnera à vitesse maximale. Si maintenant la sortie O2 est mise à 0, la sortie analogique CHANNEL 0 (UA1 de X2) permettra de régler la vitesse de la pompe sous forme de tension 0/10V.

#### I.3.2 Vanne à bille

Le montage V102, qui a pour rôle de contrôler l'écoulement du fluide du réservoir haut (B102) vers celui du bas (B101), représente une vanne à bille tout ou rien actionnée par un processus d'entraînement pneumatique.

Cet équipement de contrôle consiste en une vanne en cuivre (1) ouverte/fermée par un actionneur quart de tour à double effet de type SYPAR (4), contrôlé par une électrovanne 5/2 voies de type NAMUR (2,3).



**Figure I.6 Processus de la vanne à bille**

L'indicateur de position (5) consiste en deux micro-interrupteurs électriques avec levier à roulement, ces deux derniers délivrent des signaux 24VDC (S113, S114) vers le terminal E/S XMA1.

### I.3.3 Éléments de contrôle de niveau tout ou rien

Trois types de surveillance de niveau sont présents dans l'installation :

- Détecteurs de proximité capacitifs dans le réservoir B101 ;
- Flotteur de sécurité anti-débordement dans le réservoir B101 ;
- Flotteurs pour la détection des seuils de remplissage dans les deux réservoirs B101 et B102.

#### I.3.3.1 Détecteurs de proximité capacitifs

Les détecteurs de proximité B113 (1), B114 (2) sont fixés sur une plaque derrière la paroi externe du réservoir (B101), leur position est mécaniquement ajustable. Ils délivrent des signaux 24V et sont reliés au terminal E/S XMA1.



**Figure I.7 Détecteurs de proximité capacitifs**

Le détecteur de proximité du bas, assure un remplissage minimum de manière à maintenir la résistance chauffante complètement immergée, et donc la protéger. Celui du haut définit quant à lui le niveau maximum pour le même réservoir.

### I.3.3.2 Flotteur de sécurité anti-débordement

Le débordement du réservoir B101 est surveillé par flotteur S111, Si le niveau d'eau excède le niveau maximum, le cylindre transparent constituant le flotteur sera poussé vers le haut. Les aimants qui sont à l'intérieur de ce cylindre actionnent un contact électrique.



**Figure I.8 Flotteur de sécurité anti débordement**

Le signal binaire 24 V, généré par le flotteur S111 est transmis au terminal E/S XMA1. Cette entrée peut activer une alarme dans le programme contenu dans l'API, et avoir un effet direct sur l'arrêt de la pompe P101 ou bien sur la fermeture de la vanne V102.

### I.3.3.3 Flotteur pour la détection des seuils de remplissage

Le flotteur S112 (1) peut être utilisé, soit comme moyen de contrôler le niveau dans le réservoir B101, soit pour arrêter l'action chauffage de l'eau si le niveau de l'eau est critique.

Le signal binaire 24V généré par le flotteur est transmis au terminal E/S XMA1.



**Figure I.9 Flotteur pour la détection des seuils de remplissage**

### I.3.4 Vanne proportionnelle

La vanne proportionnelle V106 (1) est directement actionnée par une électrovalve 2/2 voies, elle est utilisée comme élément de réglage dans les systèmes de contrôle de débit et pression. Le principe est que le piston de la vanne est soulevé de son siège par l'intermédiaire d'un électroaimant, et libère ainsi l'écoulement à travers la vanne à un débit proportionnel à la surface ouverte.



**Figure I.10 Vanne proportionnelle**

La vanne proportionnelle est activée par une sortie binaire (O4 dans le XMA1). Un signal analogique du canal (UA2 de X2) actionne le signal d'entrée de la vanne proportionnelle avec un signal analogue standard de (0...10V). Ce dernier est transformé en pulsations modulées en largeur. L'ouverture de la vanne peut ainsi être ajustée à n'importe quelle position de sa plage de fonctionnement.

### I.3.5 Capteur ultrasonique de niveau

La fonction du système de contrôle de niveau est de réguler le niveau de remplissage du réservoir B102.



**Figure I.11 Capteur ultrasonique de niveau**

Le niveau du fluide dans le réservoir B102 (1) est contrôlé à l'aide d'un capteur ultrasonique (2). Le signal analogique délivré par le capteur ultrasonique sous forme de courant, passe par un convertisseur courant/tension avant d'être transmis au CHANNEL 0 du terminal E/S X2 (UE1).

### I.3.6 Capteur fréquentiel de débit

Le débit de l'écoulement du fluide à travers le système de canalisations est déterminé par le moyen d'un capteur optoélectronique B102 (2). Le signal carré transmis par le capteur sous forme d'une onde modulée en fréquence peut, soit être connecté directement avec une entrée binaire dans le terminal E/S XMA1, soit connecté au terminal analogique X2 (UE2) après avoir été traité par un convertisseur fréquence/tension.



Figure I.12 Capteur fréquentiel de débit

### I.3.7 Capteur de pression

La pression du fluide circulant dans le système de canalisation qui alimente le réservoir pré-rempli de gaz (air) pressurisé B103 (1), peut être mesurée à l'aide d'un capteur de pression relative piezorésistif. Le signal transmis par ce dernier est directement connecté au terminal analogique X2 (UE3).



**Figure I.13 Capteur de pression**

### I.3.8 Capteur de température

L'eau stockée dans le réservoir B101 et chauffée par un échangeur de chaleur E104 (3), est circulé à travers le système de canalisation à l'aide de la pompe P101 (1). Un capteur de température de type PT100 est utilisé pour mesurer la température du système.



**Figure I.14 Capteur de température**

La résistance du capteur de température est connectée à un convertisseur PT100/tension avant d'être connectée au terminal analogique X2 (UE4). Quant à l'échangeur de chaleur, il est contrôlé par une sortie binaire (O1 dans le XMA1).

On résume les caractéristiques techniques des différents composants dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I-2 Caractéristiques techniques de l'installation**

Paramètre	Caractéristique
Pression opérationnelle maximale	50 kPa
Alimentation	24 VDC
Support	7000 × 700 × 32mm

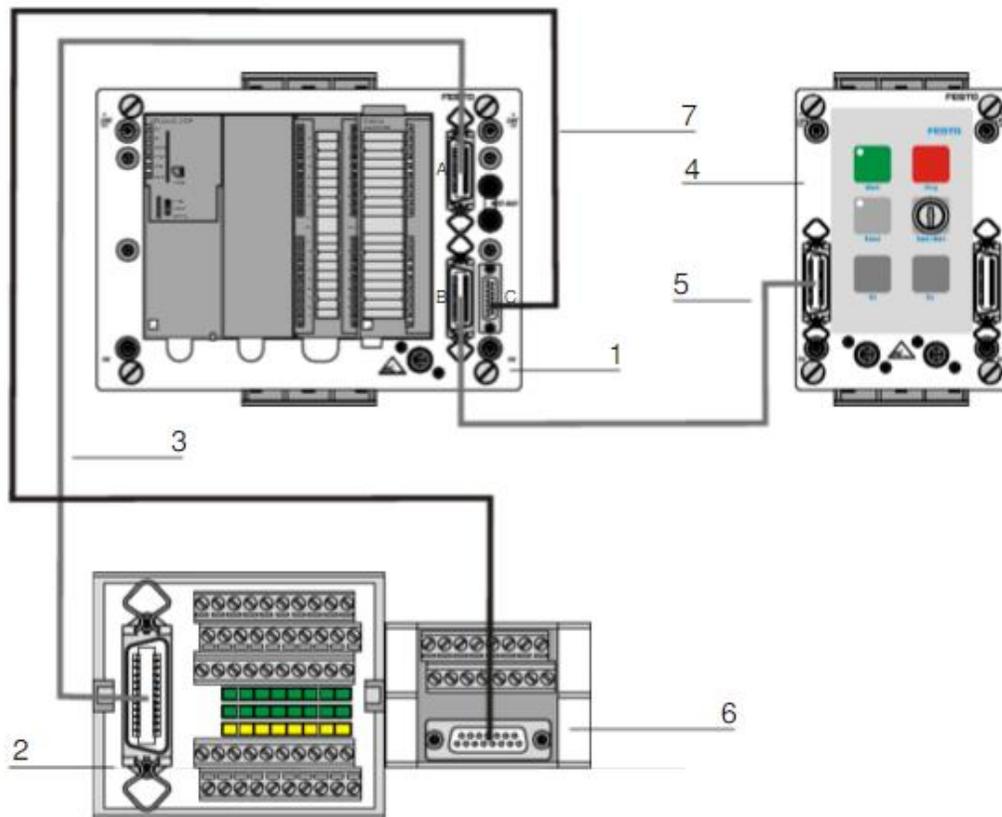
## Chapitre I : Système didactique de contrôle des processus « FESTO »

Débit maximal de la pompe	10 l/min
Volume des réservoirs	12 l max
Canalisations flexibles	DN15 ( $\varnothing$ à 15 mm)
Entrées binaires	7
Sorties binaires	5
Entrées analogiques	4
Sorties analogiques	2
Nombre de réservoirs	3
<b>Eléments de contrôle</b>	
Pompe (0...24 VDC)	Tension 0...10V
Facteur d'échelle de débit de la pompe	1V $\rightarrow$ 0.1 l/min
Vanne proportionnelle 2/2 voies	Tension 0...10V
Eléments chauffant (230 VAC, 100Watt)	ON/OFF (relai de contrôle 24VDC)
<b>Systèmes en boucle fermée</b>	
<b>Système de contrôle de niveau</b>	
Plages des valeurs du système de contrôle de niveau	6...350 mm
Plages des valeurs du capteur de niveau	0...300 mm
Facteur d'échelle	300 $\rightarrow$ 10V
Type de signal transmis par le capteur de niveau	Courant 4...20 mA
<b>Système de contrôle de débit</b>	
Plages des valeurs du système de contrôle de débit	0...7 l/min
Facteur d'échelle	10V $\rightarrow$ 9 l/min
Plages des valeurs du capteur de débit	0,3...9,0 l/min
Type de signal transmis par le capteur de débit	Fréquence 0...1200Hz
<b>Système de contrôle de pression</b>	
Plages des valeurs du système de contrôle de pression	0...30 kPa (0...300mbar)
Plages des valeurs du capteur de pression	0..10 kPa
Facteur d'échelle	10V $\rightarrow$ 300mbr

Type de signal transmis par le capteur de pression	Tension 0...10V
<b>Système de contrôle de température</b>	
Plages des valeurs du système de contrôle de température	0...60° C
Plages des valeurs du capteur de température	-50°C... +150°C
Facteur d'échelle	10V → +150°C
Type de signal transmis par le capteur de température	Résistance PT100

### I.4 Connexions Automate-Station

Les différentes connexions entre l'automate programmable SIEMENS S7-300 CPU 313C et les autres composants de la station sont illustrer dans la figure I.15



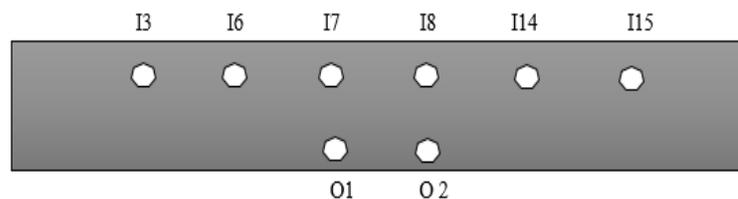
**Figure I.15 Connexions entre la station de travail et l'API**

- 1 → Station Compact avec Siemens S7-300 CPU 313C ;
- 2 → Terminal E/S binaire ;
- 3 et 5 → Câble SysLink, câble d'E/S données avec des connecteurs SysLink aux deux extrémités ;

- 4 →Panneau de commande ;
- 6 →Terminal E/S analogique ;
- 7 →Câble analogique.

### I.4.1 Connexion API-Terminal E/S

Le Plug analogique (1/C) de l'API est connecté avec X2 du terminal de conversion de signaux analogiques (6) de la station, à l'aide du câble analogique (7).



**Figure I.16 Schéma du terminal des E/S analogiques**

L'adressage du terminal des entrées/sortie analogiques est résumé dans le tableau suivant :

**Tableau I-3 Adressage correspondant au terminal des E/S analogiques**

Adresse	Composant	Identifiant
<b>Entrées</b>		
7	Capteur de débit	FIC101.1
8	Capteur de niveau	LIC102.1
14	Capteur de température	TIC104
15	Capteur de pression	PIC103
3 et 6	Reliés à la masse	
<b>Sorties</b>		
1	Pompe	P101
2	Vanne proportionnelle	V106

Le Plug digital XMA1 (1/A) de l'API est connecté avec la prise XMA2 du terminal E/S de la station (2) à l'aide du câble SysLink (3).

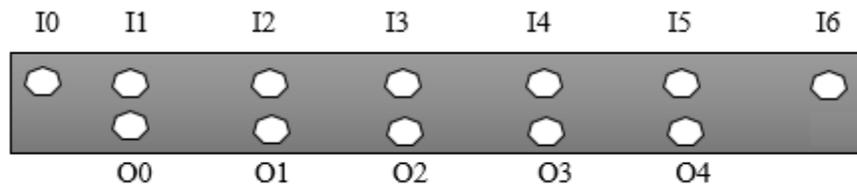


Figure I.17 Schéma du terminal des E/S binaires

L'adressage du terminal des entrées/sortie binaires est résumé dans le tableau suivant :

Tableau I-4 Adressage correspondant au terminal des E/S binaires

Adresse	Composant	Identifiant
<b>Entrées</b>		
0	Capteur de débit	
1	Flotteurs de sécurité anti-débordement	S111
2	Flotteurs de surveillance des seuils de remplissage	S112
3	Détecteur de proximité bas	B113
4	Détecteur de proximité haut	B114
5	Micro-interrupteur pour la vanne normalement ouvert	S115
6	Micro-interrupteur pour la vanne normalement fermé	S116
<b>Sorties</b>		
0	Ouverture du processus de vanne à bille V102	Y102
1	Allumage de l'élément chauffant	E104
2	Choix du mode de fonctionnement de la pompe	PompePreset
3	Pompe P101 on/off	PompeOn
4	Activation de la vanne proportionnelle	V106_On

#### I.4.2 Connexion API-Panneau de contrôle

Le Plug XMG (1/B) de l'API est connecté avec le Plug X1 (4) du panneau de contrôle à l'aide du câble SysLink (5).

### I.4.3 Connexion API-Unité d'alimentation

Le Plug d'alimentation de l'API est connecté à l'unité d'alimentation avec un câble de sécurité bleu et rouge (4mm).

### I.4.4 Connexion API-PC

Le PC est connecté à l'API avec un câble de programmation MPI.

La liste des cases mémoires qui relient la CPU à toutes les entrées/sorties de l'instrumentation est résumée dans les trois tableaux suivants :

**Tableau I-5 Tableau d'adressage des entrées binaires**

<b>Entrées binaires (station)</b>	<b>Identifiant</b>	<b>Adresse</b>
Capteur de débit (fréquence 0...1000Hz)	B102	E 0.0
Flotteurs de sécurité anti débordement (NF) LS+101 (réservoir B101)	S111	E 0.1
Flotteurs de surveillance des seuils de remplissage LS-102 (réservoir B102)	S112	E 0.2
Détecteur de proximité bas LO-101 (réservoir B101)	B113	E 0.3
Détecteur de proximité haut LO+101 (réservoir B101)	B114	E 0.4
Micro-interrupteur pour la vanne V102 (ouverte)	S115	E 0.5
Micro-interrupteur pour la vanne V102 (fermée)	S116	E 0.6
<b>Entrées binaires (panneau de contrôle)</b>		
Bouton de démarrage (NO)	S1 (START)	E 1.0
Bouton de d'arrêt (No)	S2 (ARRET)	E 1.1
Commutateur mode automatique/mode manuel	S3 (MAN/AUTO)	E 1.2
Bouton de réinitialisation (NF)	S4 (RESET)	E 1.3

**Tableau I-6 Tableau d'adressage des sorties binaires**

<b>Sorties binaires (station)</b>	<b>Identifiant</b>	<b>Adresse</b>
Ouverture du processus de vanne à bille V102	Y 102	A 0.0
Allumage de l'élément chauffant (réservoir)	E 104	A 0.1
Choix du mode de fonctionnement de la pompe	PompePreset	A 0.2
Pompe P101 on/off	PompeOn	A 0.3
Activation de la vanne proportionnelle V106	V106_On	A 0.4
<b>Sorties binaires (panneau de contrôle)</b>		
Indicateur de démarrage	H1 (START)	A 1.0
Indicateur de réinitialisation	H2 (ARRET)	A 1.1
Indicateur Q1 (opération en boucle ouverte)	H3 (MAN/AUTO)	A 1.2
Indicateur Q2 (opération en boucle fermée)	H4 (RESET)	A1.3

**Tableau I-7 Tableau d'adressage des entrées/sorties analogiques**

<b>Entrées analogiques (station)</b>	<b>Identifiant</b>	<b>Adresse</b>
Canal d'entrée analogique 0 pour le capteur de niveau (UE1 0...10V)	AE_Niveau	PEW3
Canal d'entrée analogique 1 pour le capteur de débit (UE2 0...10V)	AE_Débit	PEW5
Canal d'entrée analogique 2 pour le capteur de pression (UE3 0...10V)	AE_Pression	PEW7
Canal d'entrée analogique 3 pour le capteur de température (UE4 0...10V)	AE_Température	PEW9
<b>Sorties analogiques (station)</b>		
Canal de sortie analogique pour la pompe P101	AA_Pompe	PAW3
Canal de sortie analogique pour la vanne proportionnelle V106	AA_Vanne	PAW5

### I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système étudiant qui est la station de travail compacte « FESTO », on a donc cité les différents instruments constituant l'installation ainsi que les systèmes de contrôle que la station permet de manipuler et qu'on va réguler par la suite. Nous avons aussi vu les différentes connexions entre l'installation et l'API qui permettent la communication entre ces deux.

Nous allons passer par la suite à l'étude des différents systèmes présents dans l'installation.

# Chapitre II

## Identification et régulation PID

### II.1 Introduction

La régulation automatique (automatic control) est la technique de l'ingénieur offrant les méthodes et les outils nécessaires à la prise de contrôle d'une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système en vue d'imposer le comportement.

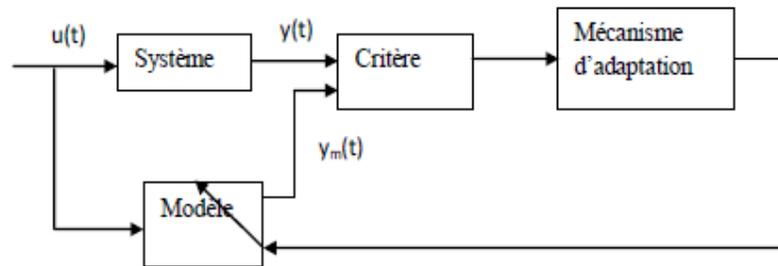
De nos jours, quasiment toutes les industries, les appareillages électromagnétiques, et les chaînes de production utilisent forcément l'asservissement et la régulation pour maîtriser plusieurs grandeurs physiques telles que la température, pression, vitesse, poids, distance...etc.

Le long de ce chapitre nous allons réguler le niveau, le débit, la pression et la température. Nous commencerons par l'identification qui consiste à représenter chacun de ces systèmes par son modèle mathématique. On synthétisera ensuite pour chaque système de contrôle un régulateur approprié qui assurera les performances désirées.

### II.2 Identification des systèmes

#### II.2.1 Principe de l'identification [14]

Le développement des modèles mathématiques est un problème majeur pour l'application des techniques avancées de l'analyse, la commande, l'optimisation, la surveillance et le diagnostic des processus. Identifier un système dynamique réel c'est le représenter par un modèle, à partir de la connaissance expérimentale des entrées et sorties, de manière à obtenir une identité de comportement.

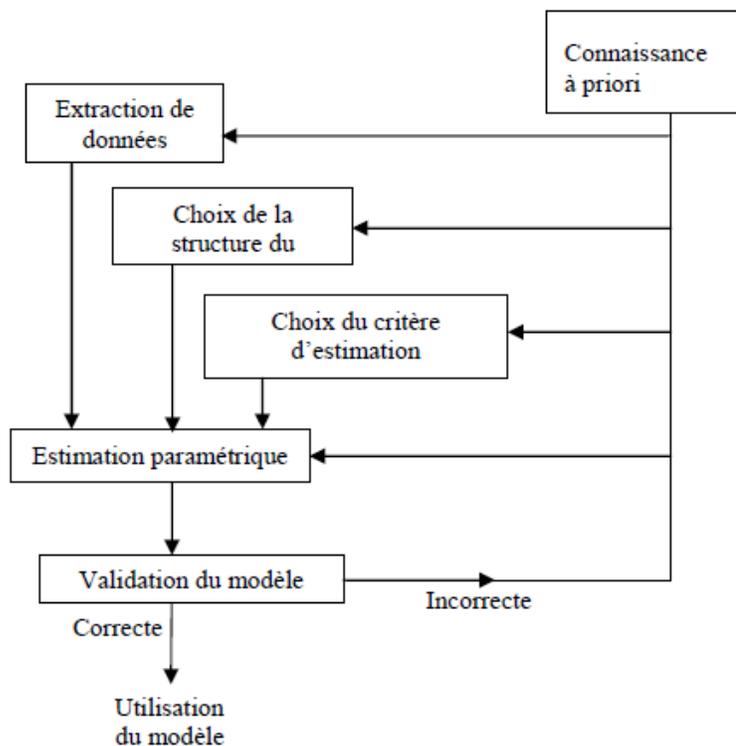


**Figure II.1 Principe de l'identification d'un système**

La modélisation mathématique est une représentation qui traduit le fonctionnement d'un système à travers des relations mathématiques liant les différentes variables du système. Elle peut se faire de deux façons différentes :

- **Modélisation théorique** : la représentation du système est faite à partir des lois (physiques, chimiques, biologiques, etc.) régissant le fonctionnement du système. Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance complète du système. Cette modélisation peut présenter des difficultés lorsqu'elle est appliquée à des systèmes complexes. Les modèles de ce type sont appelés modèles de connaissance ou modèles de type « boîte blanche ».
- **Modélisation expérimentale (identification)** : la représentation est faite sur la base de données recueillies sur le système à modéliser. Cette représentation ne requiert que quelques connaissances à priori sur le système. Les modèles de ce type sont appelés modèles expérimentaux ou de type « boîte noire ». Ils sont représentés en général sous la forme d'une relation de type « entrée-sortie ». Dans certains cas, les connaissances à priori sur le système permettent de fixer la structure du modèle. La combinaison de ces connaissances à priori et des données expérimentales recueillies permet d'aboutir à une représentation du système communément appelé modèle de type « boîte grise ».

L'établissement de la modélisation expérimentale est une procédure itérative comportant cinq phases (voir figure II.2) :

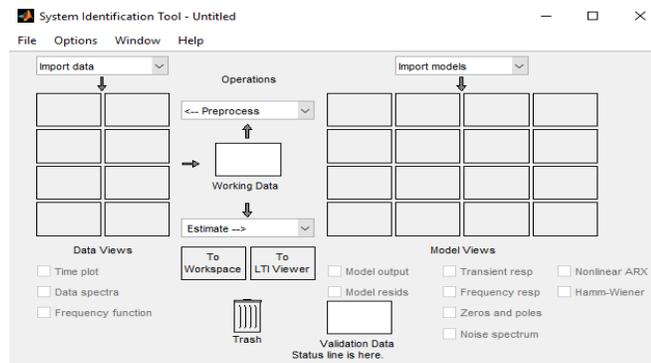


**Figure II.2 Procédure d'identification d'un système**

La phase d'estimation paramétrique est basée sur des méthodes d'optimisation, en ce qui concerne notre application, nous nous sommes basés sur l'outil d'identification de Matlab afin de déterminer les paramètres des différents systèmes.

### II.2.2 Identification avec Matlab

La commande « Ident » sur Matlab permet d'accéder à un outil d'identification des systèmes (figure II.3) qui permet d'obtenir des modèles dynamiques de systèmes en utilisant des données d'entrée-sortie provenant du système à identifier. Les différentes étapes sont l'importation des données, l'estimation des paramètres du modèle et la validation du modèle.



**Figure II.3 Interface graphique de l’outil Ident**

L’interface représente chaque jeu de données ou modèle estimé par une icône dans les zones rectangulaires. Les jeux de données se retrouvent à gauche et les modèles à droite. Il est possible de déplacer ces icônes en cliquant dessus et en les déplaçant.

Elle contient également les menus déroulants :

- Import data : pour les commandes liées à l’importation de données ;
- Import models : pour les commandes liées à l’importation de modèles ;
- Preprocess : pour les commandes liées à la création de nouveaux jeux de données basés sur les données en cours d’utilisation (« Working Data ») ;
- Estimate : pour les commandes liées à la création de modèles basés sur les données en cours d’utilisation.

Dans ce qui va suivre, nous allons expliquer les étapes suivies afin d’identifier les systèmes de l’installation avec cet outil.

### II.2.2.1 Importation de données

En premier lieu, il faut effectuer l’acquisition des données à partir du logiciel WinCC afin d’étudier la réponse indicielle de système. On injecte donc un échelon d’amplitude 80% à l’entrée du système et on archive les valeurs dans un fichier Excel.

Pour l’archivage des données, nous avons créé un script WinCC qui permet de choisir la fréquence d’échantillonnage ainsi que le nombre d’échantillons désirés pour l’identification, puisque l’archivage standard de WinCC ne permet pas de choisir un temps d’échantillonnage inférieur à une seconde (voir annexe E).

Les données sont donc stockées dans un fichier Excel dans un chemin spécifique, ce fichier qu’on va importer à l’interface en cliquant sur « Time domain data » dans le menu « Import data » et on

## Chapitre II : Identification et régulation PID

choisit par la suite le vecteur d'entrée ainsi que le vecteur de sortie et le temps d'échantillonnage correspondant à celui de l'archivage effectué comme le montre la figure II.4 :

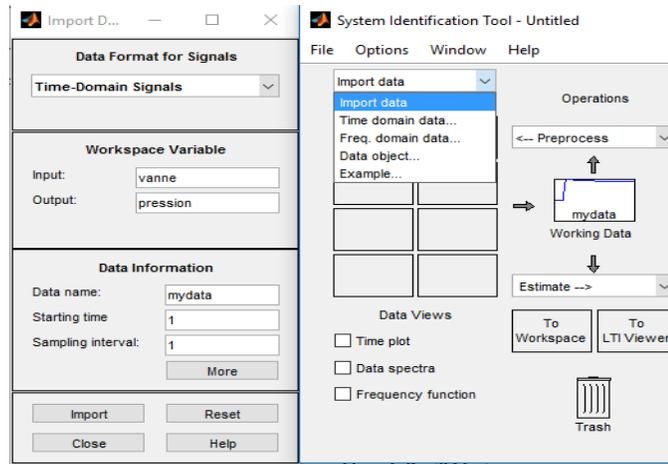


Figure II.4 Fenêtre d'importation de données

### II.2.2.2 Estimation des paramètres

Dans le menu « Estimate », on choisit « Transfert function model », et ensuite dans la fenêtre qui apparaît, on choisit le nombre de pôles et de zéros pour enfin estimer la fonction de transfert (figure II.5).

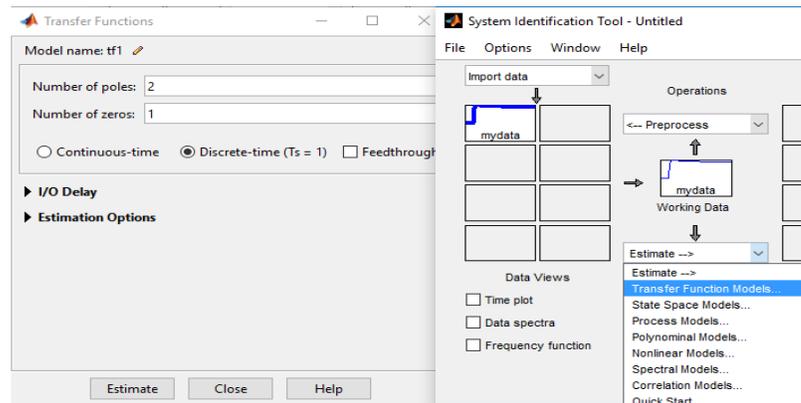


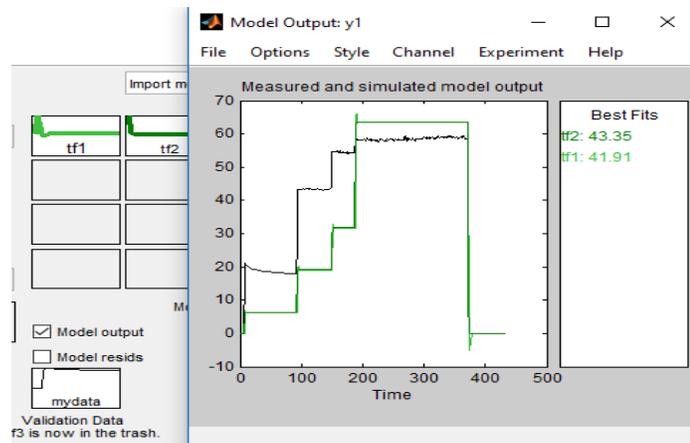
Figure II.5 Fenêtre d'estimation des paramètres du « Transfert Function model »

### II.2.2.3 Validation du modèle

À l'étape de validation, le modèle se retrouve dans la section de droite. Il existe 6 options pour les modèles linéaires et 2 pour les non-linéaires. Ces options se retrouvent sous « Model Views ». L'option de visualisation « Model output » permet d'apprécier le pourcentage d'ajustement du

## Chapitre II : Identification et régulation PID

modèle par rapport aux données de validation. Un clic droit sur l'icône du modèle permet d'en afficher les informations.



**Figure II.6 Visualisation des sorties des modèles de validation avec « Model output »**

Ainsi, en choisissant le modèle dont le comportement correspond le mieux à celui de notre système (celui qui a le pourcentage le plus élevé), l'étape d'identification s'achève. Nous allons passer maintenant à la description et la régulation de chaque système de contrôle.

### II.3 Régulation des systèmes de contrôle de l'installation

Comme c'est précédemment mentionné, la station FESTO permet d'effectuer plusieurs régulations sur l'installation, le choix de la boucle de régulation se fait par une combinaison bien précise des vannes présentes sur la station (voir tableau de configuration de l'annexe B).

#### II.3.1 Système de régulation du niveau

Le but de la régulation du niveau est de contrôler le niveau de remplissage du réservoir B102 à partir du liquide (l'eau) qui se trouve dans le réservoir B101, à travers un système de canalisation dont la pompe est l'élément de contrôle. Cette dernière, utilisée en mode analogique délivre le liquide du réservoir B101 vers le réservoir B102, de façon à ce que la lecture de niveau de remplissage délivrée par le capteur ultrasonique (LIC102) doit rester constante même si des perturbations entrent en jeu, notamment la vanne automatique V102 comme moyen de drainage. Après avoir effectué les configurations nécessaires, le diagramme synoptique de l'installation devient :

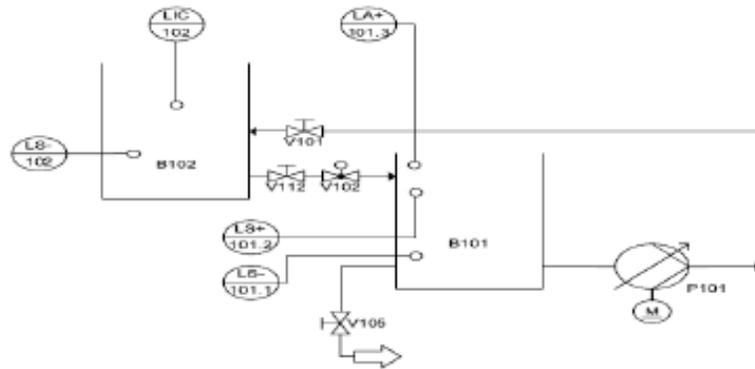


Figure II.7 Circuit relatif à la régulation du niveau

### II.3.1.1 Description du fonctionnement

Le capteur ultrasonique transmet la valeur de niveau de remplissage sous forme de courant (4...20mA), qui est converti ensuite en une tension standard (0...10V) par le convertisseur courant/tension (A1), qui va être réceptionner par l'API à travers le canal 0 du terminal analogique X2. L'API génère la valeur de réglage (0...10V) qui est transmise au moteur de contrôle (M1) de la pompe par l'intermédiaires d'un relai K1 et d'un convertisseur tension/tension (A4). Ce dernier permettra d'adapter la tension standard (0...10V) en une tension 0...24V.

Le diagramme électrique (figure II.8) explique ce principe de fonctionnement :

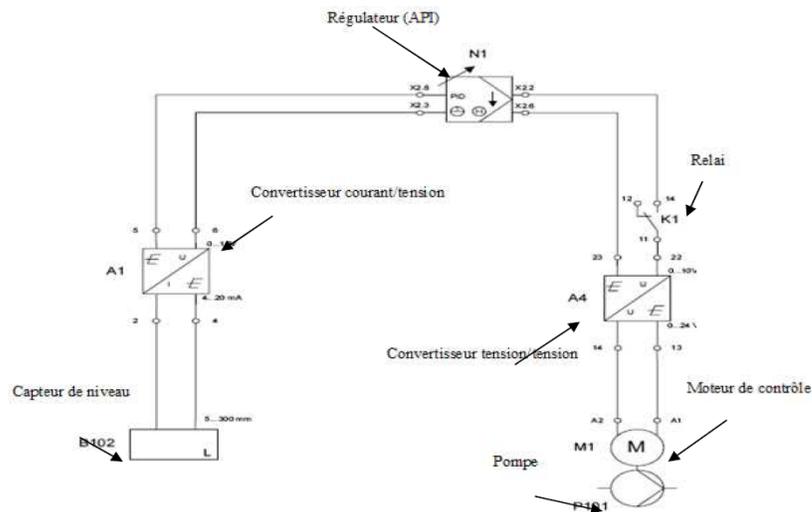


Figure II.8 Diagramme électrique de principe de la régulation de niveau analogique

### II.3.1.2 Identification du système de contrôle du niveau

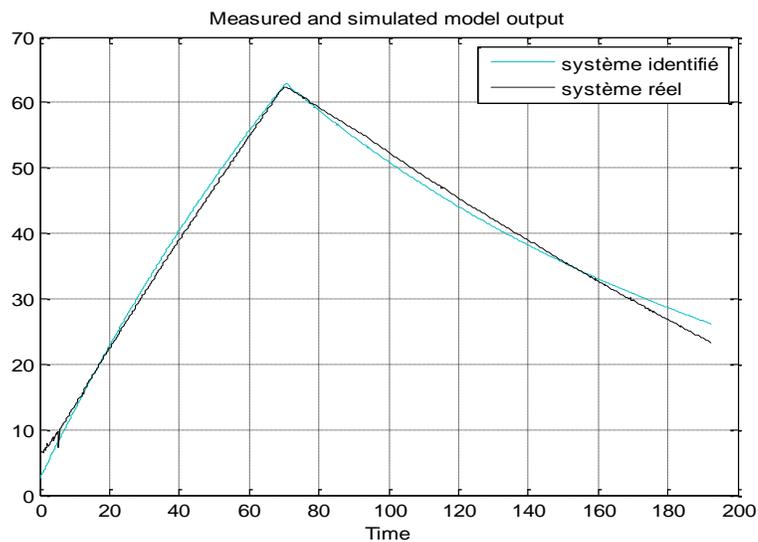
Pour l'identification de ce système, nous nous sommes basés sur la méthode expliquée un peu plutôt dans ce chapitre avec l'interface d'identification de Matlab. Nous avons estimé deux fonctions de transfert pour ce premier système de régulation pour bien montrer la validation des paramètres choisis.

- Identification avec un système de premier ordre :

La fonction de transfert de 1<sup>er</sup> ordre estimé par l'outil d'identification est la suivante :

$$F_1(s) = \frac{1.864}{1 + 157.16 s}$$

La validation de cette fonction de transfert est montrée dans la figure II.9 :



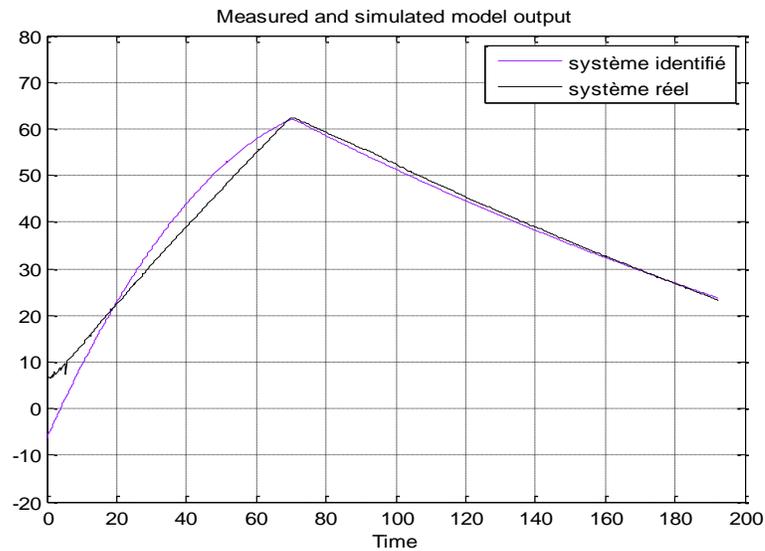
**Figure II.9 Validation de l'identification avec un système de 1<sup>er</sup> ordre**

- Identification par un système de 2<sup>nd</sup> ordre :

La fonction de transfert de second ordre estimé :

$$F_2(s) = \frac{0.009724 s + 0.00009531}{s^2 + 0.0116 s + 0.0000607}$$

La validation est montrée dans la figure II.10 :

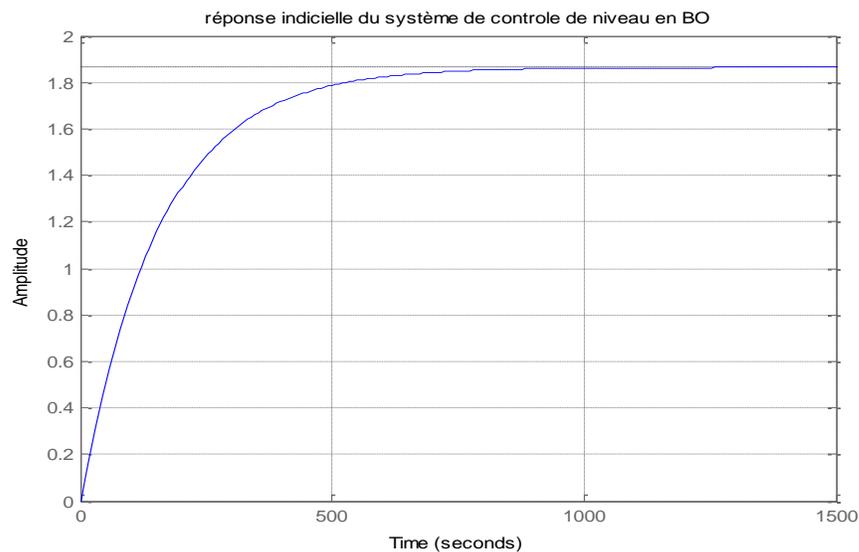


**Figure II.10 Validation de l'identification avec un système de 2<sup>nd</sup> ordre**

La validation des deux modèles montre que le système de 1<sup>ier</sup> ordre est valide à 97.26% alors que celui de 2<sup>nd</sup> est valide à 84.96%. Nous concluons donc que le premier système est plus proche du système étudié.

### II.3.1.3 Synthèse du régulateur PI

La réponse de système étant lente et contient une erreur statique, permet de conclure qu'une action intégrale est requise pour assurer la poursuite (figure II.11).



**Figure II.11 Réponse indicielle du système de contrôle de niveau en BO**

## Chapitre II : Identification et régulation PID

La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par :

$$R(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti}$$

Pour le calcul des paramètres du régulateur, la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$F_{BO}(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti} \frac{1.864}{1 + 157.16 s}$$

En choisissant  $Ti = 157.16s$  ;

$$F_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{157.16}{1.864 Kp} s} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

On constate que le système en boucle fermée va se comporter comme un système de premier ordre dont la constante du temps apparente  $\tau$  est réglable par  $Kp$ .

Le paramètre  $Kp$  est réglé en choisissant un temps de réponse  $Tr$  pour le système en boucle fermée.

Le temps de réponse à 5%  $Tr = 3\tau = 3 \frac{Ti}{1.864 Kp}$

D'où

$$Kp = 3 \frac{Ti}{1.864 Tr}$$

La fonction de transfert de régulateur est donc donnée (pour  $Tr = 20s$ ) par :

$$R(s) = 12.65 \frac{1 + 157.16 s}{157.16 s}$$

La figure II.12 montre la réponse du système régulé.

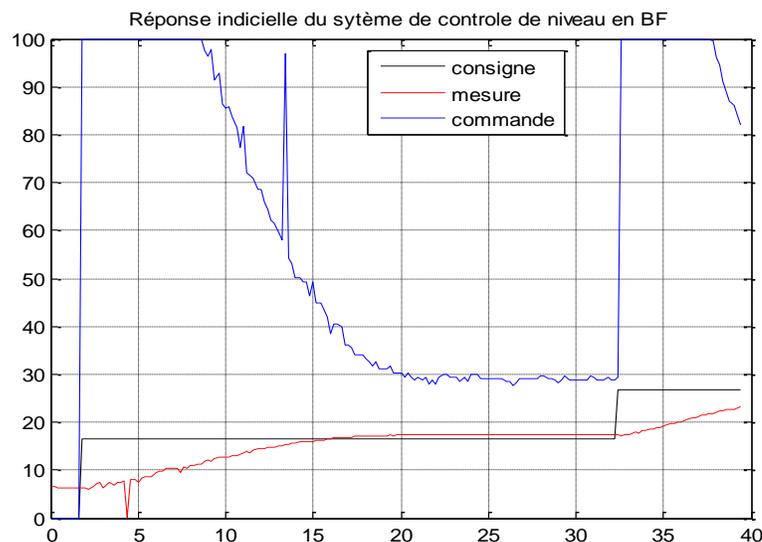


Figure II.12 Réponse indicielle du système de niveau réel en boucle fermée

## Chapitre II : Identification et régulation PID

Nous remarquons, que le niveau suit la consigne avec un temps de réponse de 20s et une erreur statique qui tend vers zéro. Nous constatons aussi des oscillations de la commande dues au bruit de capteur, mais le régulateur a pu assurer la stabilité de la commande et le maintien de la sortie, ce qui répond aux performances exigées.

### II.3.2 Système de régulation de débit

La régulation de débit dans un système de canalisation est indispensable, dans notre cas cette régulation se fait, soit en commandant la pompe, soit en commandant la vanne proportionnelle V106.

En effectuant les configurations nécessaires, deux diagrammes synoptiques de l'installation sont donc possibles.

#### II.3.2.1 Système de régulation de débit avec la pompe comme contrôleur

Le premier diagramme synoptique de cette régulation donne :

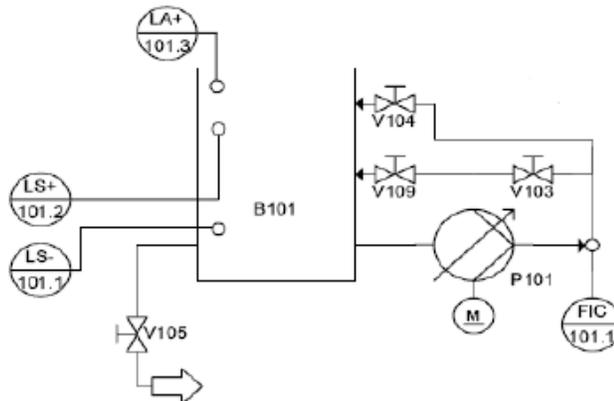


Figure II.13 Circuit relatif à la régulation de débit avec la pompe

L'élément de contrôle, pompe le liquide de réservoir B101 à travers la canalisation, qui passe par un capteur de débit optoélectronique, pour le réinjecter ensuite dans ce même réservoir.

Le débit doit rester constant et suit parfaitement la consigne même en présence des perturbations (ouverture/fermeture des vannes manuelles).

#### II.3.2.1.1 Description du fonctionnement

Le capteur optoélectronique mesure la valeur du débit et la transmet sous la forme d'une onde carrée (0...1000Hz), cette valeur est ensuite convertie en une tension standard (0...10V) par le

## Chapitre II : Identification et régulation PID

convertisseur de fréquence/tension (A2), puis l'API la réceptionne à travers le canal UE2 du terminal analogique X2.

La valeur de réglage (0...10V) générée par l'API est transmise au moteur de contrôle (M1) de la pompe par un relais K1 et un convertisseur tension/tension (A4). Ce dernier permettra d'adapter la tension standard (0...10V) en une tension (0...24V).

Le diagramme électrique suivant explique ce principe de régulation :

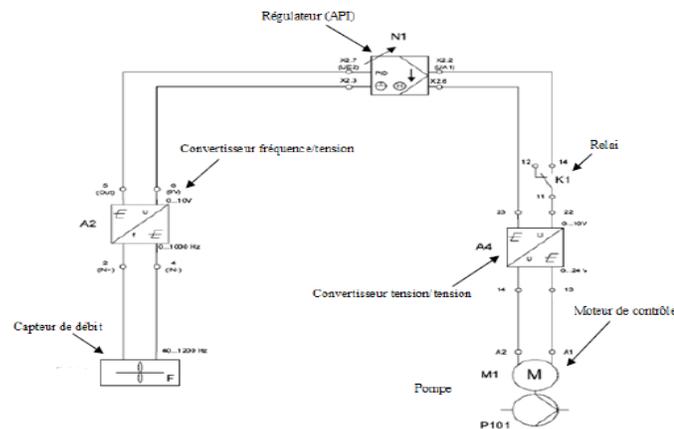


Figure II.14 Diagramme électrique de la régulation de débit avec la pompe

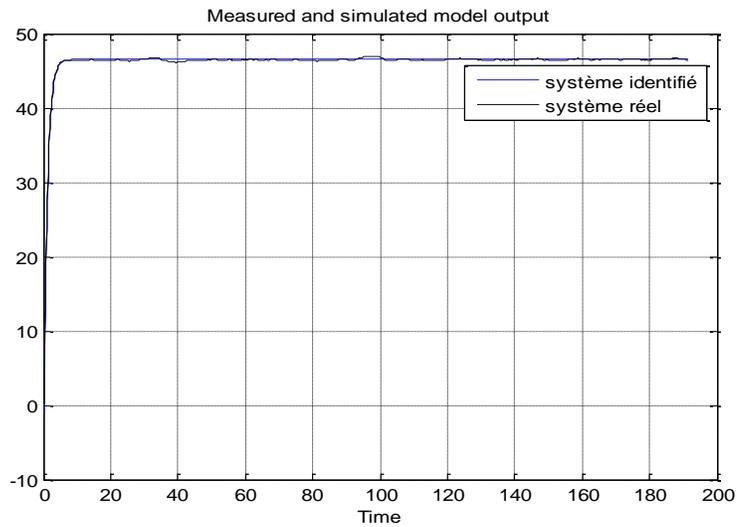
### II.3.2.1.2 Identification du système de contrôle débit-pompe

Nous avons adapté le même principe que pour l'identification de niveau, nous avons donc injecté à l'entrée du système (la pompe) un échelon d'amplitude 80%, puis nous avons archivé les valeurs dans un fichier Excel pour estimer la fonction de transfert avec l'outil d'identification des systèmes de Matlab.

La réponse de ce système est assimilée à celle d'un système du premier ordre, la fonction de transfert est donnée par :

$$F(s) = \frac{0.581}{1 + 1.0957 s}$$

La figure II.15 montre la validation de la fonction de transfert estimé.

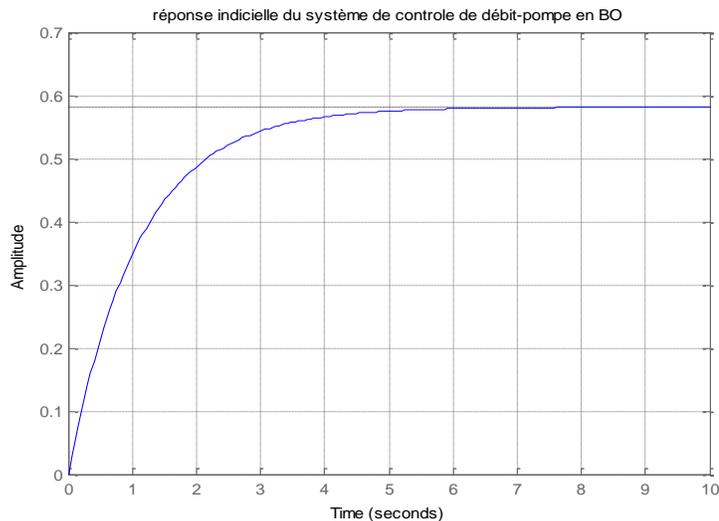


**Figure II.15 Validation de l'identification de système de contrôle de débit-pompe**

Les réponses des deux systèmes sont pratiquement identiques, d'où la validation de notre FT estimé.

### II.3.2.1.3 Synthèse du régulateur PI

La réponse indicielle en boucle ouverte de ce système est montrée dans la figure suivante :



**Figure II.16 Réponse indicielle du système débit-pompe en boucle ouverte**

On constate qu'une action intégrale est requise d'où le choix du régulateur, dont la fonction de transfert est donnée par :

## Chapitre II : Identification et régulation PID

$$R(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti}$$

On a donc en boucle ouverte :

$$F_{BO}(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti} \frac{0.581}{1 + 1.0957 s}$$

On prend  $Ti = 1.0957s$  ;

$$F_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1.0957}{0.581 Kp} s} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

On constate que le système en boucle fermée va se comporter comme un système du premier ordre dont la constante de temps apparente  $\tau$  est réglable par  $Kp$ .

Le temps de réponse à 5%  $Tr = 3\tau = 3 \frac{1.0957}{0.581 Kp}$

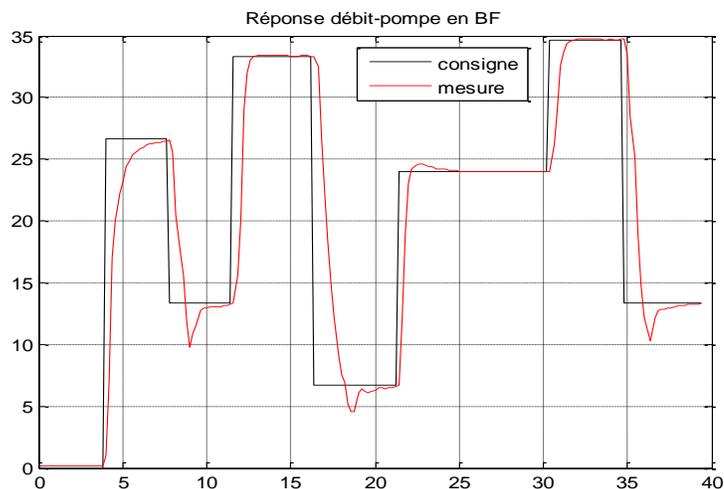
D'où

$$Kp = 3 \frac{1.0957}{0.581 Tr}$$

La fonction de transfert du régulateur est donc donnée (pour  $Tr = 2s$ ) par :

$$R(s) = 2.83 \frac{1 + 1.0957s}{1.0957 s}$$

La réponse du système répond donc à l'objectif de commande (figure II.17).



**Figure II.17 Réponse indiciale du système réel débit-pompe en boucle ouverte**

Le débit atteint la consigne avec un temps de réponse égale à 2s et les perturbations sont entièrement rejetées, Le dépassement relevé est de 1 % et répond donc au cahier des charges.

### II.3.2.2 Système de régulation de débit avec la vanne comme contrôleur

Le deuxième diagramme synoptique possible pour la régulation de débit donne :

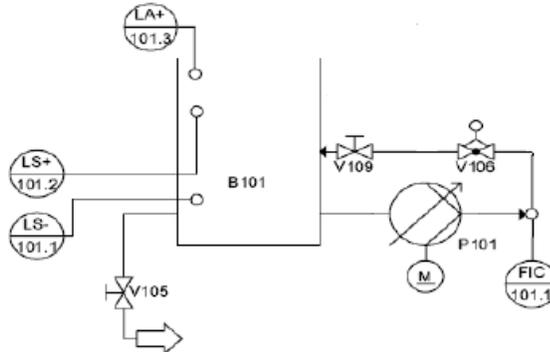


Figure II.18 Circuit relatif à la régulation de débit avec la vanne proportionnelle

#### II.3.2.2.1 Description du fonctionnement

Dans cette régulation, la pompe est utilisée à vitesse constante et pompe le fluide du réservoir B101 à travers le système de canalisation, passant par la vanne proportionnelle V106 qui ajuste la section de passage afin de varier le débit pour ensuite réinjecter le liquide dans le même réservoir. Le principe de fonctionnement de cette régulation est le même que quand la pompe est l'élément de contrôle comme le montre le schéma électrique de la figure II.19.

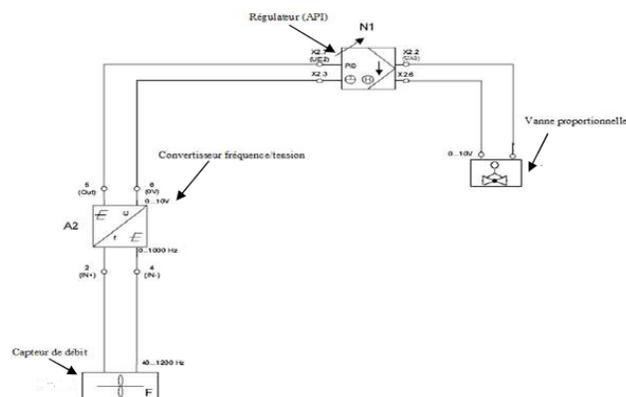


Figure II.19 Diagramme électrique de la régulation du système débit-vanne

#### II.3.2.2.2 Identification du système débit-vanne

Pour l'identification du système vanne-débit, on envoie un échelon d'amplitude 80% à la vanne analogique, les valeurs de la réponse du système sont stockées dans un fichier Excel, qu'on va importer par la suite sur Matlab pour l'identifier avec l'outil d'identification des systèmes.

## Chapitre II : Identification et régulation PID

La fonction de transfert estimée est d'ordre 1 :

$$F(s) = \frac{0.439}{1 + 1.045 s}$$

La figure suivante montre la validation de cette fonction de transfert :

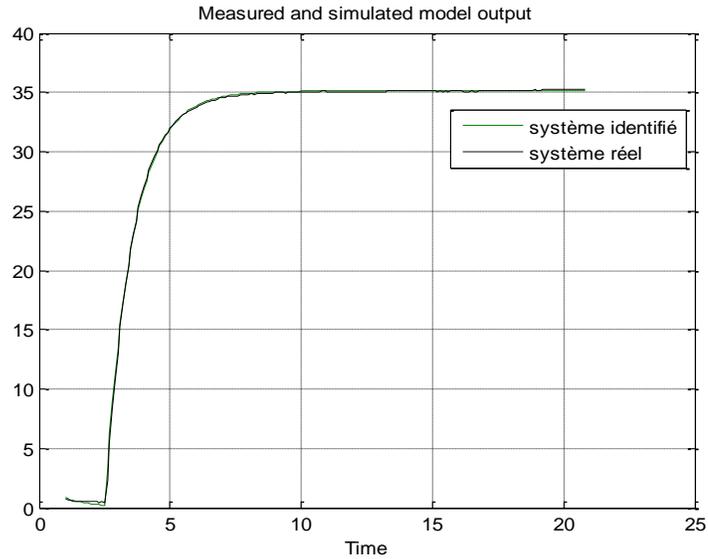


Figure II.20 Validation de l'identification du système de contrôle débit-vanne

### II.3.2.2.3 Synthèse du régulateur PI

La réponse indicielle en boucle ouverte de ce système est montrée dans la figure suivante :

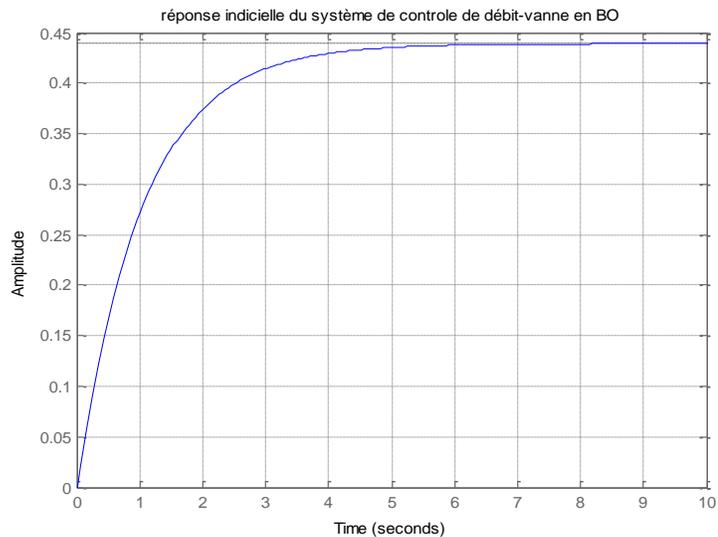


Figure II.21 Réponse indicielle du débit réelle (vanne) en boucle ouverte

## Chapitre II : Identification et régulation PID

On constate qu'une action intégrale est requise d'où le choix du régulateur, dont la fonction de transfert est donnée par :

$$R(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti}$$

On a donc en boucle ouverte :

$$F_{BO}(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti} \frac{0.439}{1 + 1.045 s}$$

On prend  $Ti = 1.045s$  ;

$$F_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1.045}{0.439 Kp} s} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

On constate que le système en boucle fermée va se comporter comme un système du premier ordre dont la constante de temps apparente  $\tau$  est réglable par  $Kp$ .

Le paramètre  $Kp$  est réglé en choisissant un temps de réponse  $Tr$  pour le système en boucle fermée ;

$$\text{Le temps de réponse à 5\% } Tr = 3\tau = 3 \frac{1.045}{0.439 Kp}$$

D'où

$$Kp = 3 \frac{1.045}{0.439 Tr}$$

La fonction de transfert du régulateur est donc donnée (pour  $Tr = 2s$ ) par :

$$R(s) = 3.57 \frac{1 + 1.045s}{1.045 s}$$

La réponse indicielle, ainsi que la commande sont montrées dans la figure II.22.

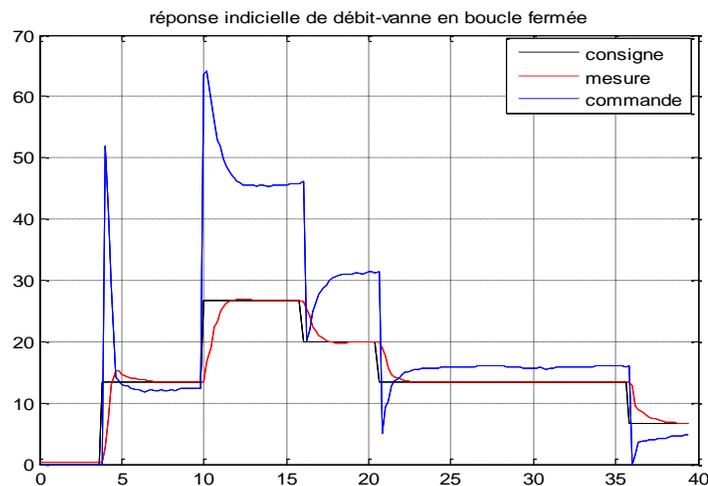


Figure II.22 Réponse indicielle du système réel débit-vanne en boucle fermée

## Chapitre II : Identification et régulation PID

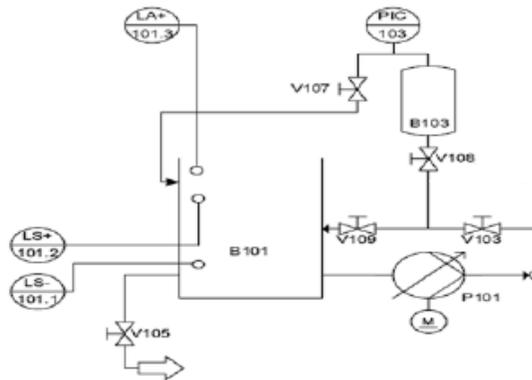
Nous constatons d'après la figure ci-dessus que le régulateur a stabilisé le système et annulé l'erreur statique. A noter que le temps de réponse est 1s ce qui est conforme aux résultats théoriques.

### II.3.3 Système de régulation de pression

La pression doit être contrôlée dans un système de canalisation, comme le débit, deux systèmes de contrôle de pression sont possibles, soit en utilisant la pompe comme élément de contrôle, soit en utilisant la vanne proportionnelle comme élément de contrôle.

#### II.3.3.1 Système de régulation de débit avec la pompe comme contrôleur

Le premier diagramme synoptique de l'installation pour cette régulation est le suivant :



**Figure II.23** Circuit relatif à la régulation de pression avec la pompe comme contrôleur

La pompe étant l'élément de contrôle, délivre le liquide du réservoir B101 vers le réservoir B103 pré-rempli d'air avec la vanne manuelle V107, la pression de l'air comprimé est calculée par un capteur piézorésistif et transmise à l'API. Cette pression doit rester constante malgré les perturbations des vannes manuelles.

#### II.3.3.1.1 Description du fonctionnement

Le capteur de pression mesure la pression actuelle dans le réservoir B103, cette valeur est transmise à l'API sous forme d'une tension standard (0...10V) à travers le canal UE3 du terminal analogique X2.

La valeur de réglage (0...10V) générée par l'API est transmise au moteur de contrôle (M1) de la pompe par l'intermédiaire d'un relais K1 et d'un convertisseur tension/tension (A4). Ce dernier permettra d'adapter la tension standard (0...10V) en une tension 0...24V.

## Chapitre II : Identification et régulation PID

Ce principe est montré dans le diagramme électrique suivant :

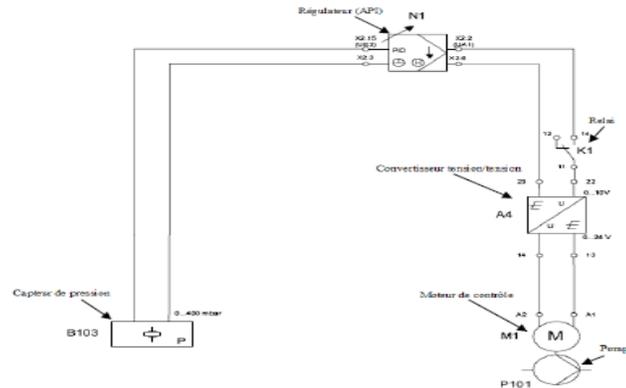


Figure II.24 Diagramme électrique de principe de la régulation de pression avec la pompe

### II.3.3.1.2 Identification du système

À cause du phénomène de pompage nous n'avons pas pu identifier correctement le système de contrôle de pression. Cependant, nous avons tenté d'atteindre le régime critique et ensuite archivé les valeurs de la réponse indicielle correspondante à ce régime pour pouvoir déterminer un régulateur PID à l'aide de la méthode de Ziegler-Nichols (voir Annexe C).

### II.3.3.1.3 Synthèse du régulateur PID

Comme nous l'avons déjà mentionné, la synthèse de ce régulateur se fait à l'aide de la méthode de Ziegler-Nichols, qui consiste à varier le gain du régulateur jusqu'au régime critique.

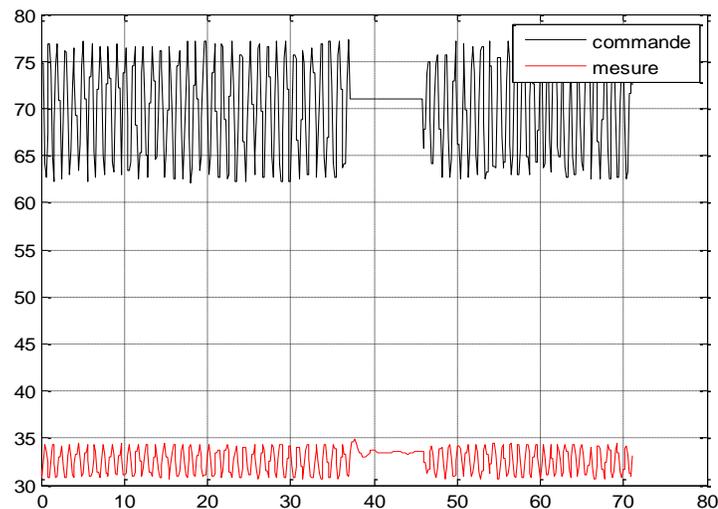


Figure II.25 Réponse indicielle critique du système réel pression-pompe

## Chapitre II : Identification et régulation PID

Le calcul des paramètres de régulateur PID est calculé avec les deux constantes caractérisant le régime critique qui sont :

- Le gain critique  $K_{cr}$  ;
- La période de pompage critique  $T_0$ .

$$\begin{cases} K_{cr} = 4 \\ T_0 = 1.6 \text{ s} \end{cases}$$

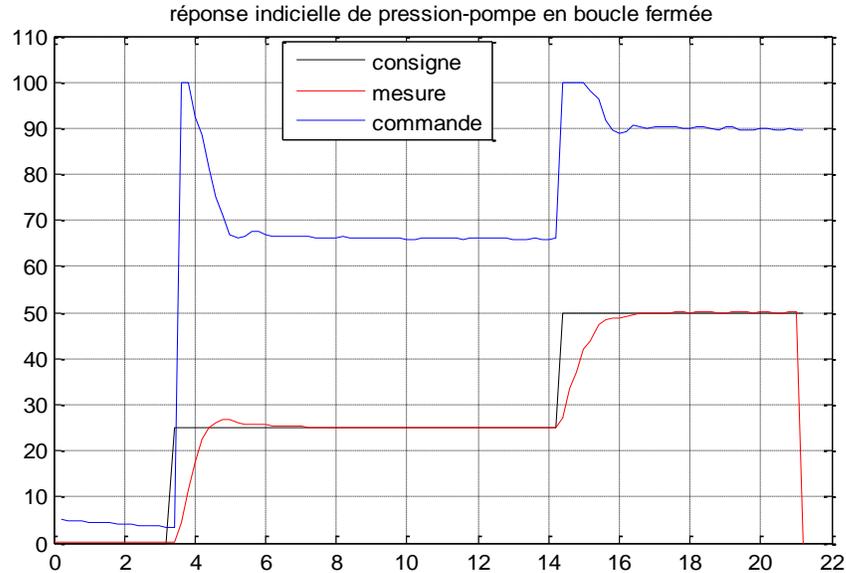
D'après le tableau de Ziegler-Nichols (voir annexe D) :

$$\begin{cases} K_p = \frac{K_{cr}}{1.7} = 2.35 \\ T_i = \frac{T_0}{2} = 800 \text{ ms} \\ T_d = \frac{T_0}{8} = 200 \text{ ms} \end{cases}$$

La fonction de transfert du régulateur est donnée par :

$$R(s) = 2.35 \left( 1 + \frac{1}{0.8 s} + 0.2 s \right)$$

La réponse du système en boucle fermée est montrée dans la figure II.26.

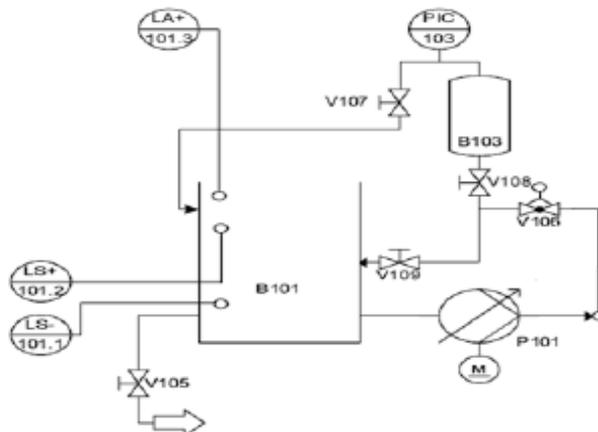


**Figure II.26 Réponse indicielle du système réel de pression-pompe en boucle fermée**

La stabilité et la poursuite sont assurées. On conclut donc que les paramètres du régulateur sont correctement ajustés.

### II.3.3.2 Système de régulation de pression avec la vanne comme contrôleur

Le deuxième diagramme synoptique possible pour cette régulation :



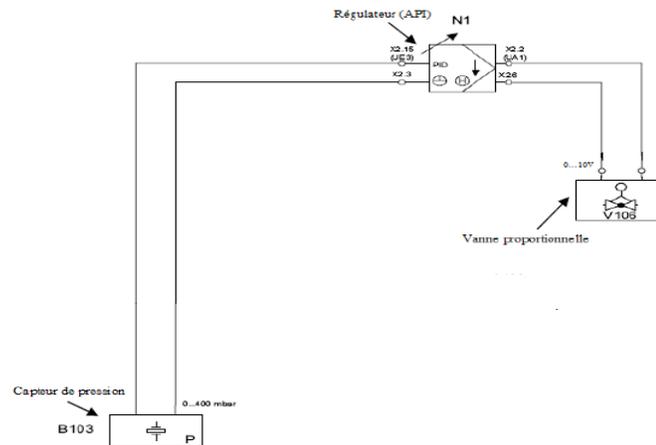
**Figure II.27** Circuit relatif à la régulation de pression avec la vanne comme contrôleur

La pompe délivre le liquide avec une vitesse constante du réservoir B101 vers le réservoir B103 pré-rempli d'air avec la vanne manuelle V107, passant par la vanne proportionnelle, dont la section de passage est infiniment ajustable et permet donc de manipuler la pression. Cette pression doit rester constante malgré les perturbations des vannes manuelles.

#### II.3.3.2.1 Description du fonctionnement

Le capteur de pression mesure la pression actuelle dans le réservoir B103, cette valeur est transmise à l'API sous forme d'une tension standard (0...10V) à travers le canal UE3 du terminal analogique X2.

La valeur de réglage (0...10V) générée par l'API est transmise au moteur de contrôle (M1) de la pompe par l'intermédiaire d'un relais K1 et d'un convertisseur tension/tension (A4). Ce dernier permettra d'adapter la tension standard (0...10V) en une tension (0...24V).



**Figure II.28** Diagramme électrique de principe de la régulation de pression-vanne

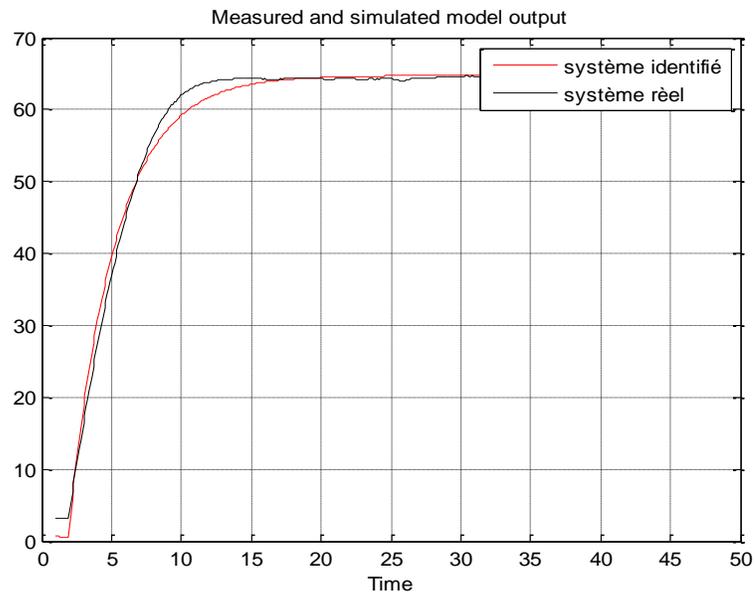
### II.3.3.2.2 Identification du système

Pour l'identification du système vanne-pression, on envoie un échelon d'amplitude 80% à la vanne analogique, les valeurs de la réponse du système sont stockées dans un fichier Excel, qu'on va importer par la suite sur Matlab pour l'identifier avec l'outil d'identification des systèmes.

La fonction de transfert estimée est d'ordre 1 :

$$F(s) = \frac{0.81}{1 + 3.31 s}$$

La figure II.29 montre la validation de cette fonction de transfert :



**Figure II.29** Validation de l'identification du système de contrôle pression-vanne

## Chapitre II : Identification et régulation PID

Nous remarquons dans la figure IV.31 une quasi superposition du système réel et du système identifié, notre modèle est donc validé.

### II.3.3.2.3 Synthèse du régulateur PI

La réponse indicielle en boucle ouverte de ce système est montrée dans la figure II.30 :

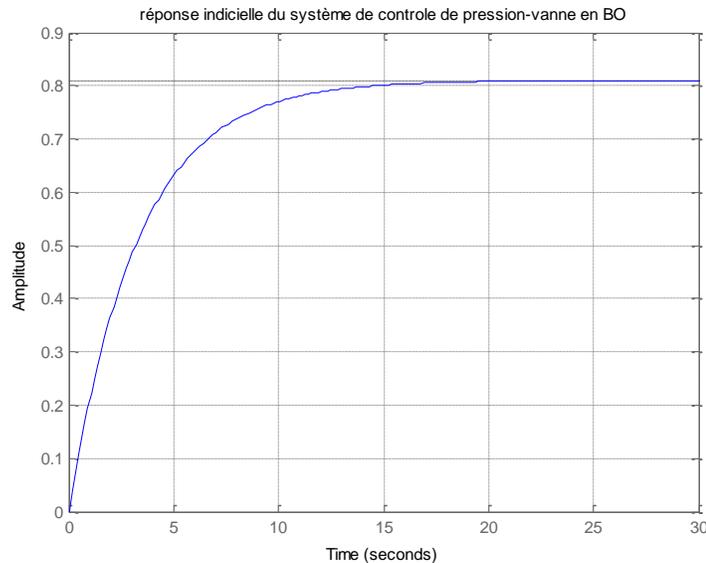


Figure II.30 Réponse indicielle du système pression-vanne en boucle ouverte

On constate qu'une action intégrale est requise d'où le choix du régulateur :

$$R(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti}$$

On a donc en boucle ouverte :

$$F_{BO}(s) = Kp \frac{1 + s Ti}{s Ti} \frac{0.81}{1 + 3.31 s}$$

On prend  $Ti = 0.139s$  ;

$$F_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{3.31}{0.81 Kp} s} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

On constate que le système en boucle fermée va se comporter comme un système du premier ordre dont la constante de temps apparente  $\tau$  est réglable par  $Kp$ .

Le temps de réponse à 5%  $Tr = 3\tau = 3 \frac{3.31}{0.81 Kp}$

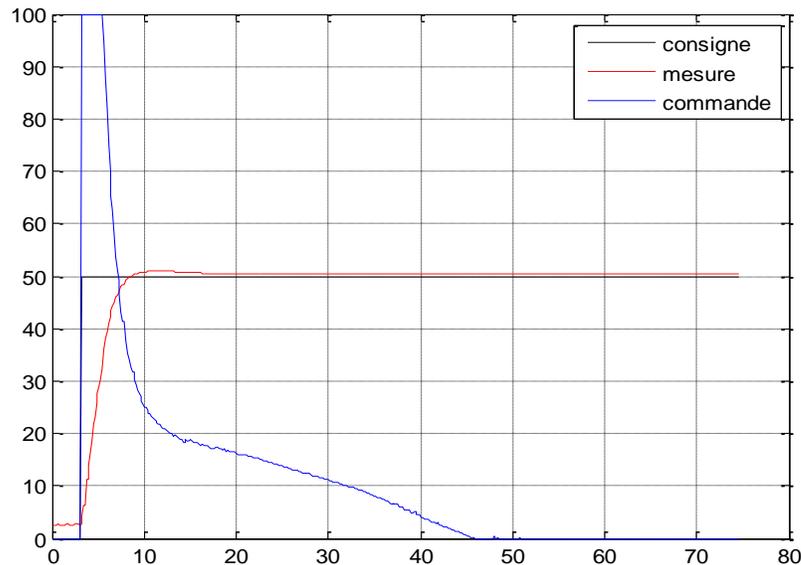
$$Kp = 3 \frac{3.31}{0.81 Tr}$$

## Chapitre II : Identification et régulation PID

La fonction de transfert du régulateur est donc donnée (pour  $Tr = 2s$ ) par :

$$R(s) = 6.128 \frac{1 + 3.31s}{3.31s}$$

La réponse du système régulé est montrée ci-dessous :



**Figure II.31 Réponse indicielle du système réel pression-vanne en boucle fermée**

Dans la figure ci-dessus on note que la sortie se stabilise à la consigne désirée, et la commande est plus lisse que dans la régulation de débit avec la pompe.

Nous pouvons conclure à partir des réponses du système de contrôle de pression que la régulation avec la vanne proportionnelle comme actionneur est plus convenable.

### II.3.4 Système de régulation de température

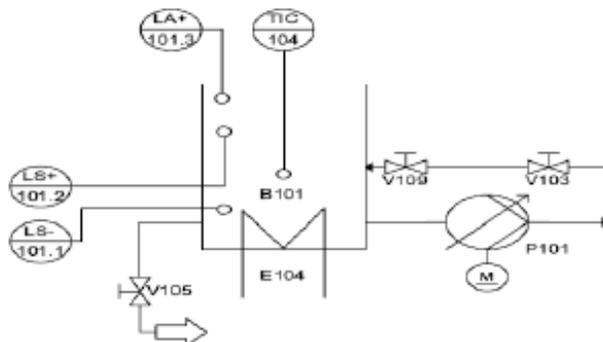
#### II.3.4.1 Description du fonctionnement

Le fluide stocké dans le réservoir B101 peut être chauffé par le moyen d'un échangeur de chaleur E104 et circulé par le moyen de la pompe (à vitesse constante). Un capteur de température de type PT100 est alors utilisé pour mesurer la température de fluide. Pour se faire il y a quelques mesures à respecter :

- La température opérationnelle du réservoir B101 ne doit pas dépasser les 65°C.
- La résistance chauffante ne doit être actionnée que si elle est complètement immergée dans le fluide.

## Chapitre II : Identification et régulation PID

Le circuit utilisé pour cette régulation est le suivant :

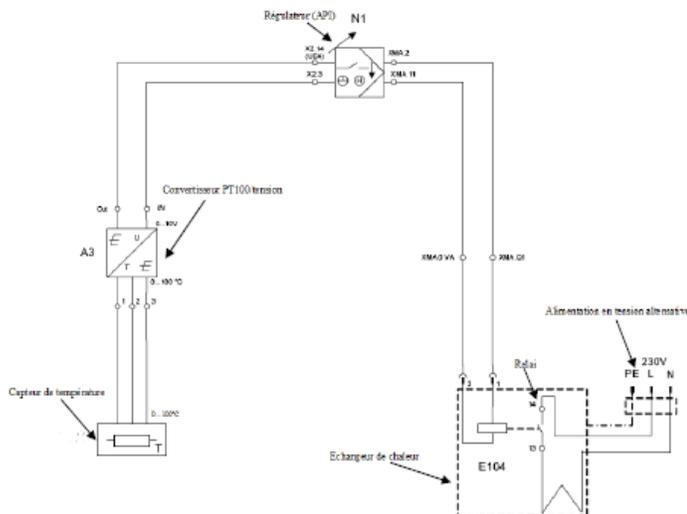


**Figure II.32** Circuit relatif à la régulation de température

La période d'allumage de la résistance chauffante, qui est dans ce cas la variable de contrôle, détermine la quantité de chaleur fournie, en sortie, par l'échangeur de chaleur E104.

Comme perturbations on peut utiliser un fluide de température différente.

Le diagramme électrique, de principe, de la boucle de régulation est schématisé comme suit :



**Figure II.33** Diagramme électrique de principe de la régulation de température

La résistance du capteur de température PT100 est connectée au convertisseur PT100/tension A3, ce dernier change la valeur de la résistance en tension standard 0...10V et ceci à travers le canal UE4 du terminal analogique X2. La résistance chauffante de l'échangeur de chaleur est contrôlée par l'intermédiaire d'un relais interne connecté directement à l'API à travers la sortie binaire O1 de XMA1.

### II.3.4.2 Régulation

La régulation de la température est une régulation tout ou rien, il suffit donc d'utiliser un comparateur afin de comparer la température du liquide à la température désirée pour allumer ou éteindre l'élément chauffant.

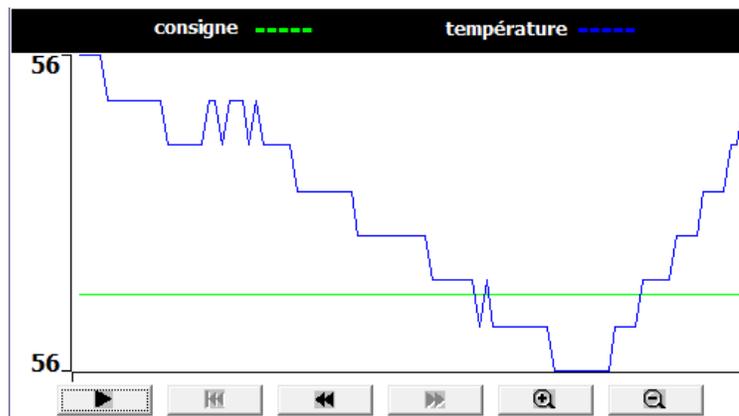


Figure II.34 Réponse du système de contrôle de température en BF

On note que la température oscille autour de la consigne avec de basses fréquences, nous pouvons donc dire que la régulation tout ou rien de la température a donné des résultats acceptables.

## II.4 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons pu mettre en pratique les concepts théoriques de l'identification, afin de déterminer les modèles mathématiques de chaque boucle de régulation, ensuite nous avons entamé la régulation en boucle fermée en commençant par le réglage de niveau avec un régulateur PI, après quoi nous sommes passés à la régulation de débit par deux stratégies, soit par la pompe ou par la vanne proportionnelle. Pour les deux boucles nous avons synthétisé un régulateur PI. En outre, pour la régulation de pression-pompe nous avons appliqué un régulateur PID synthétisé par la méthode de Ziegler Nichols. Enfin, en ce qui concerne la régulation pression-vanne nous avons appliqué une régulation PI.

# Chapitre III

## Commande Robuste

### III.1 Introduction

Les lois de commande classiques donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes, surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. On doit faire appel à des lois de commandes insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. Pour cela on utilise la commande par mode de glissement (voir annexe D) et la commande par Backstepping.

### III.2 Développement de la loi de commande par mode glissant

#### III.2.1.1 Passage à l'espace d'état

Nous avons identifié dans le chapitre précédent les différents systèmes constituant l'installation et nous avons estimé le comportement de ces systèmes par des fonctions de transfert du 1<sup>er</sup> ordre. Nous allons par la suite généraliser l'étude afin d'établir une commande standard et ensuite l'adapté avec un simple changement paramétrique.

Le modèle de fonction de transfert donné précédemment est le suivant :

$$F(s) = \frac{k}{1 + \tau s} = \frac{C1}{C2 + s} = \frac{Y}{U}$$

Avec :  $C1 = \frac{k}{\tau}$  et  $C2 = \frac{1}{\tau}$

D'où l'équation différentielle tirée de cette fonction de transfert :

$$\dot{y}(t) + C2 y(t) = C1 u(t)$$

Le système d'état est donc donné par :

$$\begin{cases} \dot{x} = -C2 x + C1 u \\ y = x \end{cases}$$

### III.2.1.2 Choix de la surface

La commande par modes glissants est calculée suivant la valeur des états du système à chaque instant. Cette loi de commande a pour but de conduire la trajectoire d'état de notre système non linéaire sur une surface pré-spécifiée (choisie) et de maintenir cette trajectoire sur cette surface, appelée surface de commutation ou de glissement. Dans le cadre de notre application, nous avons choisis la structure de la surface de Slotine (voir annexe E).

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(t)$$

Avec :

$e$  : l'erreur de poursuite :  $e=y-y_r$ .

$y_r$  : la référence.

$r$  : le degré relatif de la sortie  $y$ .

$\lambda$  : constante positive.

À partir du modèle ci-dessus, il est bien évident que le degré relatif est égal à 1 ( $r = 1$ ) (on rappelle que  $r$  c'est le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour que la commande apparaisse). Alors la surface de Slotine devient :

$$S = e = y - y_r$$

D'où :

$$S = x - y_r$$

### III.2.1.3 Conditions d'existence et de convergence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence, l'attractivité et l'invariance (voir annexe E).

On définit la fonction de Lyapounov  $V$  définie positive sur  $R$  tel que ;

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x)$$

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x)$$

La commande de commutation choisie est :

$$\dot{S}(x) = -k \text{sign}(S)$$

D'où l'attractivité de la surface de glissement :

$$\dot{V}(x) = -k|S(x)| < 0$$

La deuxième condition est satisfaite grâce à la commande équivalente :

$$\dot{S}(x) = 0 \text{ pour } S(x) = 0$$

En effet ;

$$S(x) = 0 \stackrel{eq}{\Leftrightarrow} x = y_r$$

$$\dot{S}(x) = \dot{x} = -C_2 x + C_1 u = 0$$

Donc

$$u_{eq} = \frac{C_2}{C_1} x = \frac{C_2}{C_1} y_r$$

### III.2.1.4 Établissement de la loi de commande

L'établissement de la loi de commande est la dernière étape de la conception de la commande par mode glissant.

$$\dot{S}(x) = -k \text{sign}(S) = \dot{x} = -C_2 x + C_1 u$$

D'où

$$u = \frac{1}{C_1} [C_2 x - k \text{sign}(S)]$$

Dans ce qui va suivre, nous allons passer à l'implémentation de cette loi de commande pour les différents systèmes de contrôle.

### III.2.1.5 Implémentation de la loi de commande

#### III.2.1.5.1 Système de contrôle du niveau

Le système de contrôle du niveau est modélisé par l'équation d'état suivante :

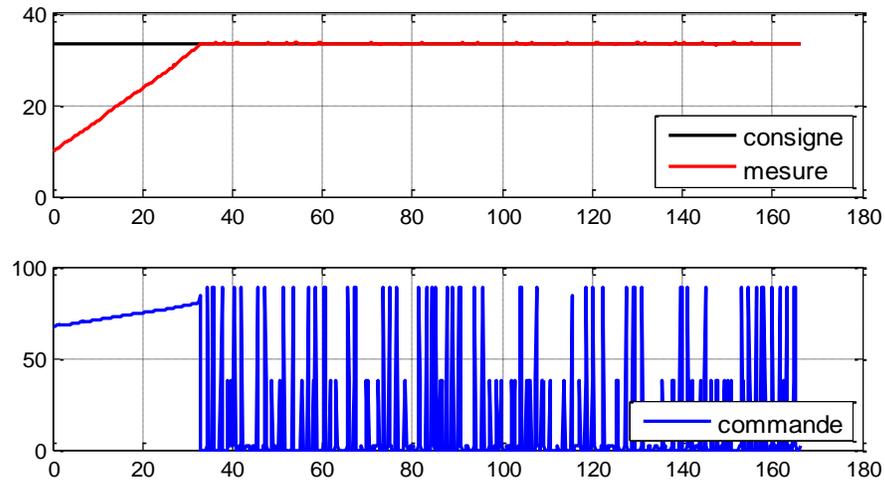
$$\begin{cases} \dot{x} = -0.006363 x + 0.01186 u \\ y = x \end{cases}$$

D'où la loi de commande :

$$u = \frac{1}{0.01186} [0.006363 x - k \text{sign}(S)]$$

L'implémentation de cette commande se fait par la programmation d'un fichier source via STEP 7 (voir annexe E).

La réponse du système réel commandé par cette loi de commande donne :



**Figure III.1** Commande du système de contrôle de niveau par mode glissant

### Commentaires :

Quand l'état du système se trouve à la limite du changement de structure, des commutations successives à fréquences élevées peuvent se produire. C'est le phénomène de broutement dont on a déjà parlé dans ce chapitre.

Pour certaines applications, le broutement n'est pas acceptable pour deux raisons principales

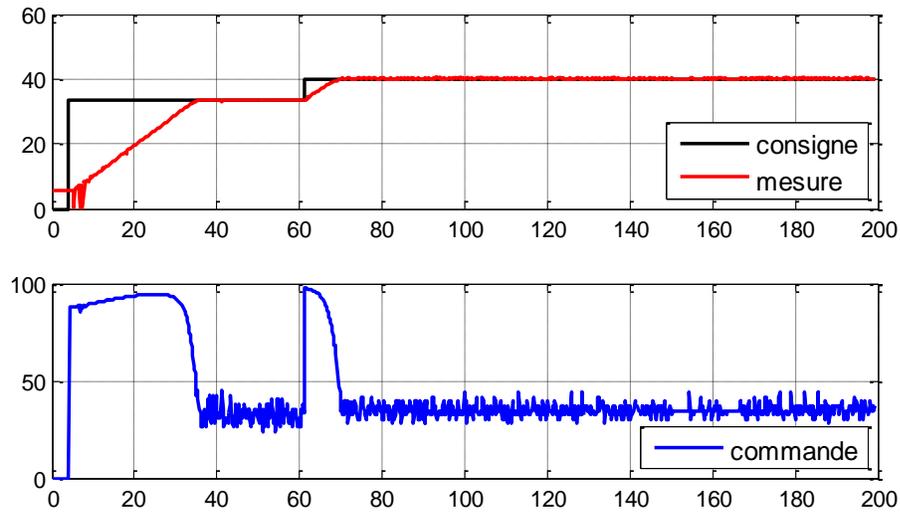
- Pour des fréquences de broutement élevées, dans certains cas, le système n'est plus modélisé correctement et peut devenir instable en boucle fermée.
- Le broutement produit une dynamique importante sur les actionneurs (moteurs), ce qui peut réduire leurs « temps de vie » et être la cause de vibrations dangereuses.

Nous avons donc développé deux améliorations contre ces problèmes :

- La première consiste à lisser la fonction signe avec une des fonctions qui assure les mêmes objectifs de commande sans commutations à fréquence infini (arctg, tanh, sat, ...).

Ce qui donne :

$$u = \frac{1}{C_1} [C_2 x - k \operatorname{arctg}(S)]$$



**Figure III.2 Commande lissée du système de contrôle de niveau par mode glissant**

- La deuxième amélioration a été établie afin de protéger le matériel des vibrations dangereuses (qu'on peut remarquer dans la commande de la figure III.2), nous avons donc ajouté un filtre passe bas pour filtrer la mesure des bruits dans les hautes fréquences, ce filtre s'intitule, filtre à moyenne glissante exponentielle. C'est un filtre passe-bas, en particulier ou de Savitzky-Golay, ce genre de filtre est souvent utilisé pour nettoyer des signaux, supprimer le bruit, moyenner des données, concevoir des dispositifs de décimation et d'interpolation, et identifier des motifs pertinents. La mesure devient :

$$x_{filtré} = x_{précédent} * e^{-\frac{Te}{\alpha}} + x * (1 - e^{-\frac{Te}{\alpha}})$$

$$x_{précédent} = x(t - Te)$$

Avec :

$Te$  : période d'échantillonnage.

$\alpha$  : temps de réponse du filtre.

La nouvelle commande devient donc :

$$u = \frac{1}{C1} [C2 x_{filtré} - k \arctg(S)]$$

Remarque :

Nous avons constaté pratiquement que la commande équivalente doit rester dans un intervalle entre 3V et 4V afin de maintenir le niveau (à cause de l'absence de clapet anti-retour dans la pompe)

alors que le modèle établi théoriquement ne permet pas à  $u_{eq}$  de satisfaire cette condition, d'où l'ajout d'un terme de compensation, en effet ;

$$\dot{x} = 0 \rightarrow u_{eq}$$

$$u_{eq} = \frac{C2}{C1} x$$

La nouvelle commande équivalente corrigée est donc :

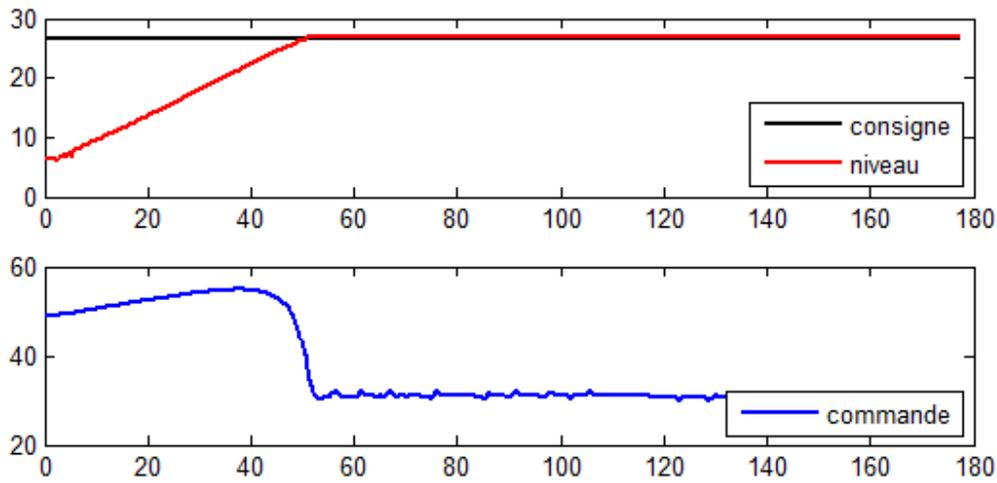
$$u_{eq} = \frac{C2}{C1} x + C3$$

D'où la commande finale de système de contrôle de niveau :

$$u = \frac{1}{C1} [C2 x_{filtré} + C1 C3 - k \arctg(S)]$$

Avec : C3 : constante de correction, déterminée pratiquement.

Pour  $k=0.2$ , la réponse du système est montrée dans la figure III.3 :



**Figure III.3** Commande finale du système de contrôle de niveau par mode glissant

La figure montre que la réponse est stable. Nous remarquons aussi une forte atténuation de broutement, nous pouvons dire que le filtre à moyenne glissante a efficacement éliminé les bruits haute fréquence.

### III.2.1.5.2 Système de contrôle débit-pompe

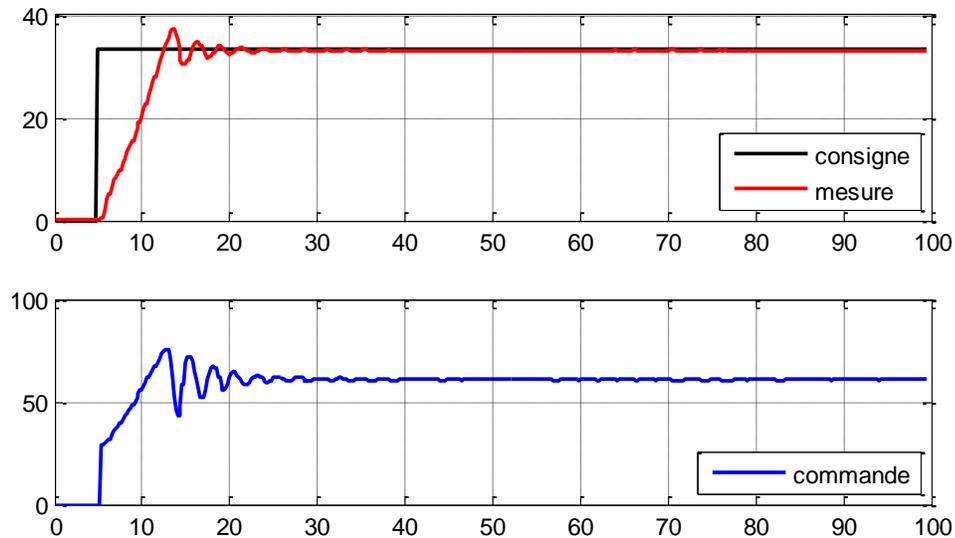
Le système de contrôle de débit actionner par la pompe est caractériser par le système d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = -0.913 x + 0.531 u \\ y = x \end{cases}$$

D'où la loi de commande par mode glissant :

$$u = \frac{1}{0.531} [0.913 x_{filtré} - k \arctg(S)]$$

Pour  $k=10$ , la réponse du système est montrée dans la figure III.4



**Figure III.4 Réponse du système de contrôle débit-pompe (mode glissant)**

### III.2.1.5.3 Système de contrôle débit-vanne

Le système de contrôle de débit actionner par la vanne proportionnelle est caractériser par le système d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = -0.957 x + 0.42 u \\ y = x \end{cases}$$

D'où la loi de commande par mode glissant :

$$u = \frac{1}{0.42} [0.957 x_{filtré} - k \arctg(S)]$$

Pour  $k=10$ , la réponse du système est montrée dans la figure III.5

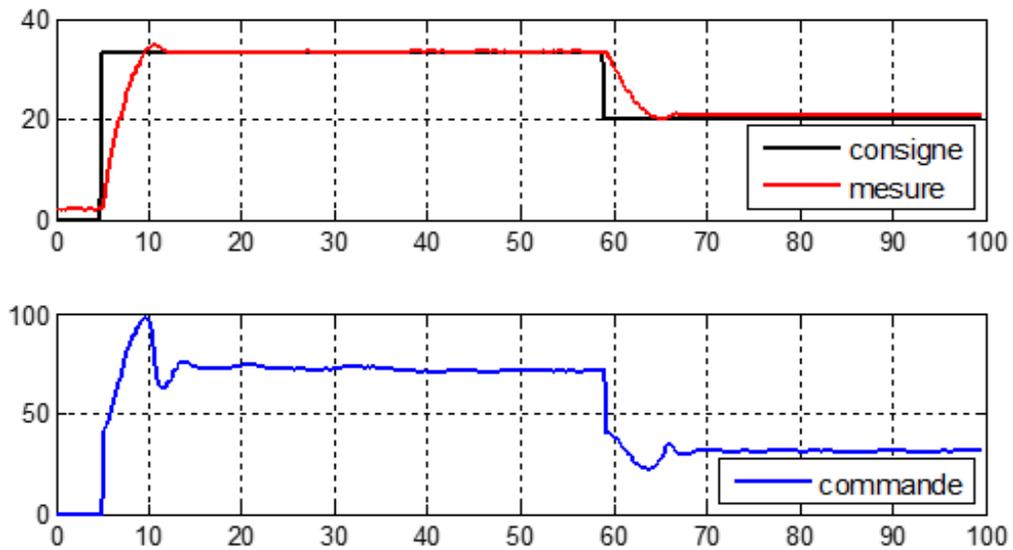


Figure III.5 Réponse du système de contrôle débit-vanne (mode glissant)

#### III.2.1.5.4 Système de contrôle pression-vanne

Le système de contrôle de pression actionner par la vanne proportionnelle est caractériser par le système d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = -0.2448 x + 0.3024 u \\ y = x \end{cases}$$

D'où la loi de commande par mode glissant :

$$u = \frac{1}{0.2448} [0.3024 x_{filtré} - k \arctg(S)]$$

Pour  $k=7$ , la réponse du système est montrée dans la figure III.6

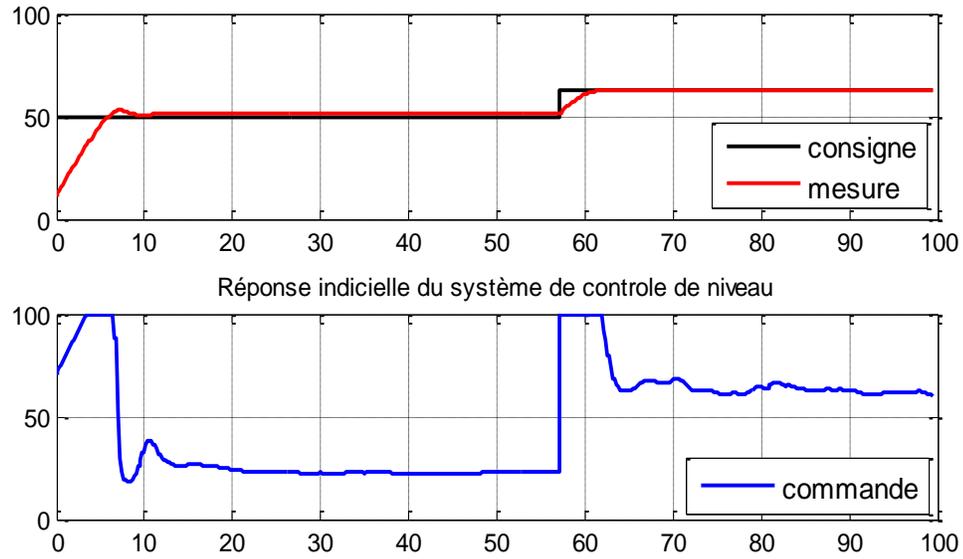


Figure III.6 Réponse du système de contrôle pression-vanne (mode glissant)

### III.3 Développement de la loi de commande par Backstepping

Les systèmes de l'installation sont régis par les équations d'état démontrées précédemment de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = -C2 x + C1 u \\ y = x \end{cases}$$

On désire construire une commande robuste pour assurer la poursuite, ce qui se traduit par une erreur qui tend vers zéro.

$$e = y - y_r = x - y_r$$

Avec :  $y_r$  constante.

Soit la fonction de Lyapounov définie positive suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2} e^2$$

$$\dot{V}(x) = e \dot{e} = (x - y_r) \dot{x}$$

Donc :

$$\dot{V}(x) = (x - y_r)(-C2 x + C1 u)$$

On désire que de la fonction de Lyapounov décroît pour assurer la poursuite, et donc la dérivée doit être définie négative sur tout le domaine de l'étude ce qui implique que :

$$\dot{V}(x) = -\lambda(x - y_r)^2$$

Avec  $\lambda$  : constante strictement positive.

D'où

$$u = \frac{1}{C1} (C2 x - \lambda(x - y_r))$$

### III.3.1.1 Implémentation de la commande

#### III.3.1.1.1 Système de contrôle de niveau

La commande par Backstepping est tirée de l'équation d'état du système de contrôle de niveau :

$$u = \frac{1}{0.01186} [0.006363 x_{filtré} - \lambda (x_{filtré} - y_r)]$$

(On note l'utilisation du même filtre auparavant décrit pour filtrer les bruits de la mesure).

La réponse est montrée dans la figure ci-dessous pour  $\lambda=0.3$  :

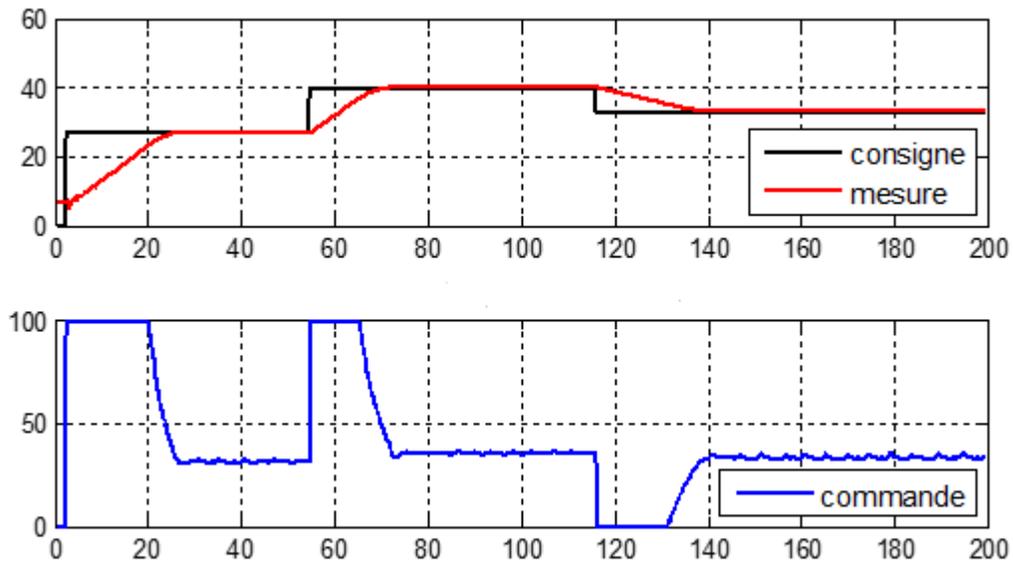


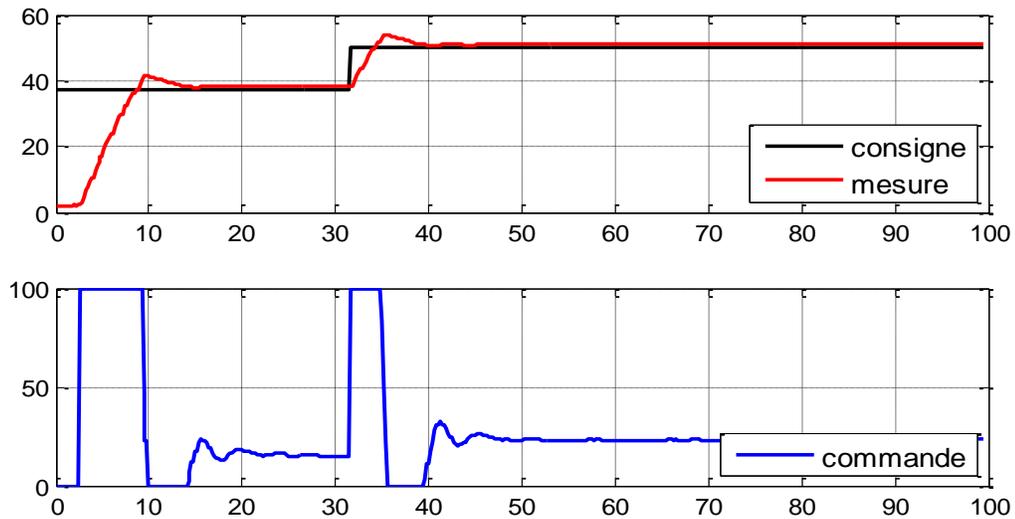
Figure III.7 Réponse du système de contrôle de niveau (Backstepping)

#### III.3.1.1.2 Système de contrôle de pression (vanne)

La commande par Backstepping est tirée de l'équation d'état du système de contrôle de pression-vanne :

$$u = \frac{1}{0.2448} [0.3024 x_{filtré} - \lambda (x_{filtré} - y_r)]$$

La réponse du système est montrée dans la figure III.8 pour  $\lambda=8$  :



**Figure III.8 Réponse du système de contrôle de pression-vanne (Backstepping)**

Comme le montre les figures ci-dessus, les deux réponses sont stables. Nous remarquons aussi que la commande est lisse et sans oscillations. Nous pouvons dire que la commande Backstepping filtrée a donné des résultats satisfaisants.

Remarque :

Le choix des constantes  $k$  et  $\lambda$  est très délicat. Il faut éviter l'instabilité du système, tout en assurant un temps de réponse convenable.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les commandes robustes à savoir la commande par mode de glissement et la commande par Backstepping afin de mettre en évidence ces commandes qui sont plus performante et insensible aux variations paramétriques.

D'abord nous avons commencé par synthétiser la commande par mode de glissement pour la régulation de niveau dont nous avons constaté l'indisponibilité d'un filtre passe bas. Afin d'éliminer les bruits issus des différents capteurs disponibles sur la station, nous avons implémenté un filtre à moyenne glissante qui se comporte comme un filtre passe bas ; ensuite nous avons généralisé l'application de ce filtre pour les autres systèmes de régulation. Dans la dernière partie de ce chapitre nous avons entamé la régulation par Backstepping pour les deux systèmes de contrôle de niveau et de pression.

# Chapitre IV

## Application

### IV.1 Introduction

Après la synthèse des différentes commandes, nous avons conçu une application afin de mettre en pratique le calcul théorique plutôt établi dans ce chapitre. En utilisant le logiciel STEP 7, nous avons élaboré un programme d'automatisation qui permet de gérer le process via WinCC. Nous avons créé une interface de visualisation, permettant la gestion du process en temps réel.

L'application est devisée en deux parties :

- La partie STEP7 qui contient les programmes principaux de régulation (Annexe E) ;
- La partie WINCC qui contient les programmes de simulation, d'interfaçage et d'affichage.

### IV.2 Présentation des logiciels

#### IV.2.1 Qu'est-ce que STEP7

STEP 7 est le progiciel de base pour la configuration et la programmation de systèmes d'automatisation SIMATIC. Il fait partie de l'industrie logicielle SIMATIC. Le progiciel de base STEP 7 existe en plusieurs versions :

- STEP 7-Micro/DOS et STEP 7-Micro/Win pour des applications autonomes simples sur SIMATIC S7-200 ;
- STEP 7 pour des applications sur SIMATIC S7-300/400, SIMATIC M7-300/400 et SIMATIC C7 présentant des fonctionnalités supplémentaires :
  - Possibilité d'extension grâce aux applications proposées par l'industrie logicielle SIMATIC (voir aussi Possibilités d'extension du logiciel de base STEP 7) ;
  - Possibilité de paramétrage de modules fonctionnels et de modules de communication ;
  - Forçage et fonctionnement multiprocesseur ;
  - Communication par données globales ;

## Chapitre IV : Application

---

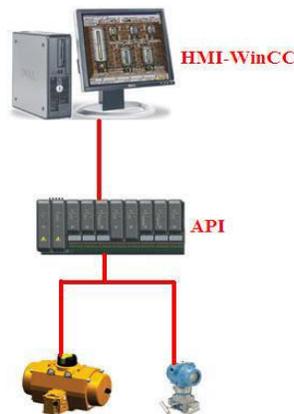
- Transfert de données commandé par événement à l'aide de blocs de communication et de blocs fonctionnels.

### IV.2.2 Qu'est-ce que WinCC flexible

Le WinCC flexible est une interface entre l'homme (utilisateur) et la machine (le processus). Le contrôle proprement dit du processus est assuré par les automates programmables (API). Une communication s'établit entre WinCC et l'opérateur d'une part et entre WinCC et les automates programmables d'une autre part.

WinCC est un système modulaire. Ses éléments de base sont le logiciel de configuration (Engineering System) et le logiciel Runtime :

- WinCC flexible Engineering System : est le logiciel avec lequel nous réalisons toutes les tâches de configuration requises, édition du projet de supervision ;
- WinCC flexible Runtime : est le logiciel de visualisation de processus en temps réel. Le projet étant en mode processus, on ne pourra parler que de son exécution.



**Figure IV.1 Communication entre le WinCC, l'API et le processus**

WinCC permet de visualiser le process et de concevoir l'interface utilisateur graphique destinée à l'opérateur.

- WinCC permet à l'opérateur de surveiller le process. Pour ce faire, le process est visualisé par un graphisme à l'écran. Dès qu'un état du process évolue, l'affichage est mis à jour ;

## Chapitre IV : Application

- WinCC permet à l'opérateur de commander le process. A partir de l'interface utilisateur graphique, il peut par exemple entrer une valeur de consigne ou ouvrir une vanne ;
- Lorsqu'un état de process devient critique, une alarme est déclenchée automatiquement. L'écran affiche une alarme en cas de franchissement d'un seuil défini par exemple ;

Les alarmes et valeurs de process peuvent être imprimées et archivées sur support électronique par WinCC. Ceci permet de documenter la marche du process et d'avoir accès ultérieurement aux données de production du passé.

### IV.2.3 Exemple d'illustration

Nous allons présenter un exemple de programmation, de simulation et d'implémentation sous STEP 7 et WinCC. Nous prenons à titre d'exemple la boucle de régulation de niveau qui va être utilisée comme actionneur qui pompe l'eau à travers la canalisation vers le réservoir B101 qui est doté d'un capteur de niveau ultrasonique. Ce dernier envoie un courant standard (4...20 mA) proportionnel au niveau réel, finalement cette valeur doit traverser un convertisseur courant tension avant d'être lue par l'automate ; l'automate sert à calculer et à générer la commande à l'actionneur (pompe). Pour faire cette régulation sous STEP 7, il faut suivre les étapes suivant :

#### ➤ Etape 1

Cette étape consiste en la création d'un nouveau projet du nom « exemple ». On prend la même CPU présente sur station didactique qui est la CPU 313C.

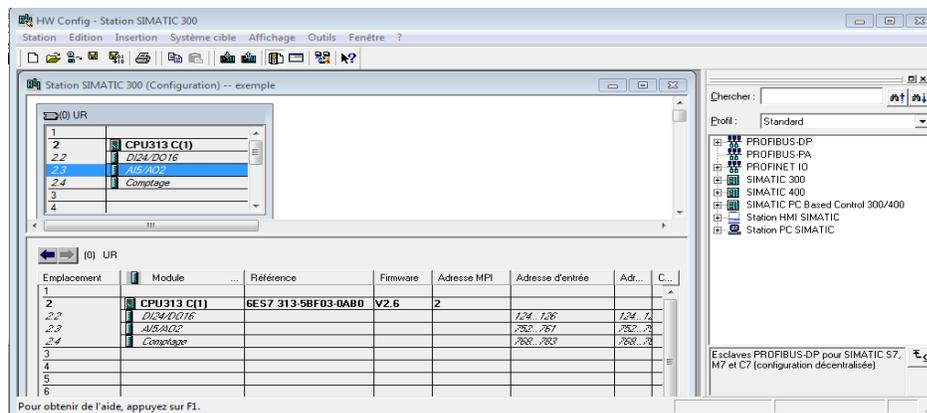


Figure IV.2 Configuration matérielle de l'exemple

## Chapitre IV : Application

On accède ensuite à la fenêtre de paramétrage des E/S analogique afin de changer l'adressage dans l'onglet « Adresses » pour un appel aux variables plus facile à retenir. On décoche alors les cases « valeurs par défaut système », et on entre les adresses souhaitées.

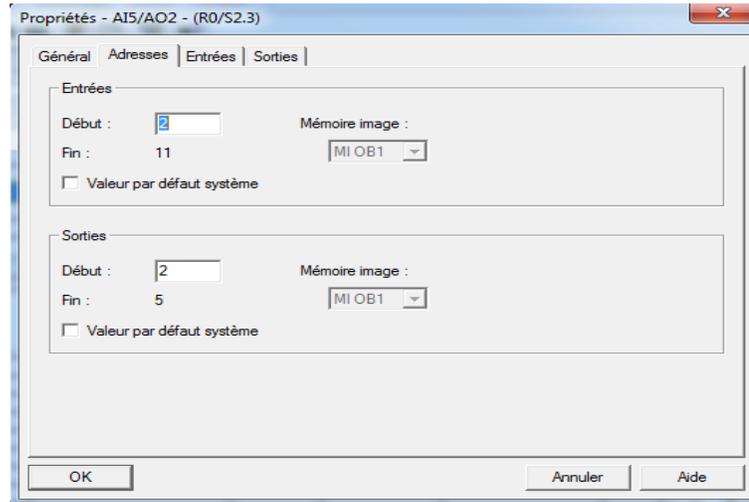


Figure IV.3 Paramétrage des entrées sorties analogiques

### ➤ Etape 2

Dans cette régulation on aura besoin que de deux variables ; l'entrée qui est lue à partir du capteur de niveau et la sortie qui est la pompe en mode analogique.

La création de la table des mnémoniques est montrée sur la figure III.21.

	Etat	Mnémonique /	Opérande	Type de d	Commentaire
1		capteur de niveau	EW 2	INT	
2		Cycle Execution	OB 1	OB 1	
3		pompe analogique	AW 2	INT	
4		SCALE	FC 105	FC 105	Scaling Values
5					

Figure IV.4 Table des mnémoniques correspondant à l'exemple

### ➤ Etape 3

Dans cette étape nous allons lire à partir de capteur de niveau, pour le faire nous avons le choix d'utiliser la fonction FC105 prédefinit par STEP 7 ou bien, créer notre une autre fonction de mise à l'échelle. Dans notre cas nous avons utilisé la fonction FC105, qui est paramétrée comme le montre la figure suivante :

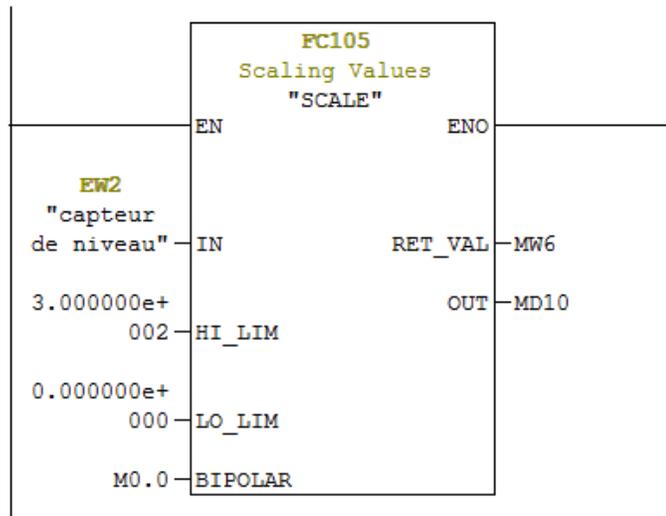


Figure IV.5 Paramétrage de la fonction FC105

➤ **Etape 4:**

Avant de commencer la regulation il faut apprendre à écrire dans les sorties. Pour ce faire, nous ferons appel a la fonction FC106, dont le fonctionnement est opposé au fonctionnement de la fonction FC105, toute fois la configuration est la même, alors on va ajouter un réseau dans OB1 et insérer la fonction FC106.

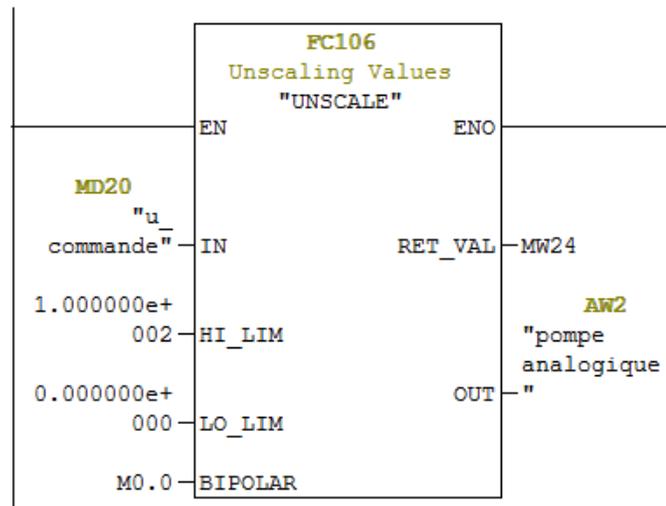
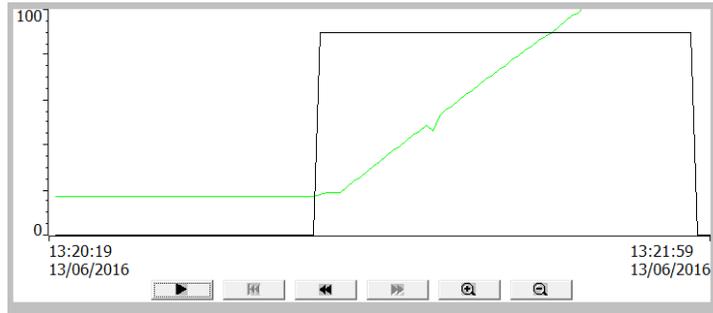


Figure IV.6 Paramétrage de la fonction FC106

## Chapitre IV : Application

### ➤ Etape 5

Cette étape vise la régulation du système avec un régulateur PID. Afin de déterminer les actions requises, nous allons injecter au système un échelon d'amplitude 90% et on tire la réponse indicielle.

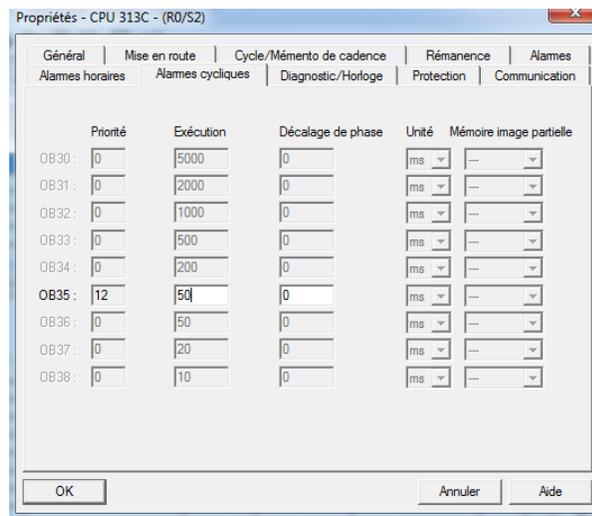


**Figure IV.7 Réponse indicielle du système de contrôle de niveau en BO**

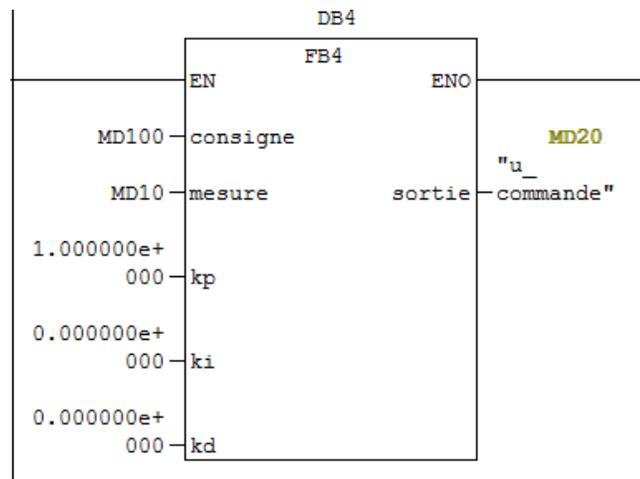
Nous remarquons que les objectifs de commande ne sont pas satisfaits, d'où la nécessité d'implémenter un régulateur, alors on programme un PID avec le langage SCL de STEP 7.

Dans un fichier SCL qu'on nomme PID (voir annexe E) on a élaboré le programme suivant :

On ajoute ce bloc dans OB 35 dont on doit régler préalablement le temps d'exécution à 50 ms.

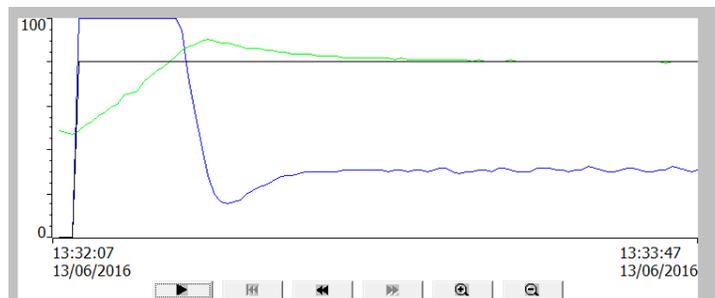


**Figure IV.8 Sélection d'un OB35**



**Figure IV.9** Fonction bloc généré à partir du code SCL

La réponse en BF est donnée par le graph sur WinCC :

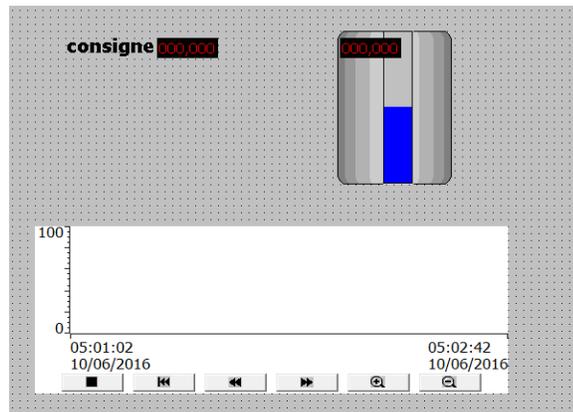


**Figure IV.10** Réponse indicielle du système de contrôle de niveau en BF

### ➤ Etape 6

Dans cette étape nous allons élaborer un programme permettant de faire la supervision du processus en temps réel, tout d'abord il faut démarrer le logiciel WINCC flexible, et configurer le pupitre selon notre PC.

Finalement nous allons élaborer une petite application permettant de visionner la valeur du niveau dans le réservoir B101, et des champs d'entrées sorties pour le saisi de la consigne et l'affichage des valeurs ainsi qu'un graph pour tracer les réponses.



**Figure IV.11 Vue de base pour la régulation de niveau**

Nous allons passer par la suite à la présentation de notre application.

### **IV.3 Programmation avec STEP7**

#### **IV.3.1 Organisation du projet**

Dans cette partie nous allons étudier chaque boucle de régulation à part, toute fois les boucles sont incorporées, ce qui rend le programme complexe, pour une explication simple et une utilisation efficace nous allons adopter plusieurs organigrammes expliquant chaque boucle de régulation.

Dans ce qui va suivre nous allons présenter plusieurs organigrammes expliquant la structure du programme, ensuite nous expliquerons la programmation de chaque boucle ainsi que l'implémentation et l'intégration des régulateurs.

##### **IV.3.1.1 Démarrage du programme**

Le programme ne démarre que si la variable « START » est mise à '1', une fois que s'est fait, le programme commence à lire les valeurs délivrées par les capteurs de niveau, de pression, de débit et de température. Ces mesures vont être utilisées, une fois que le choix de la régulation est effectué.

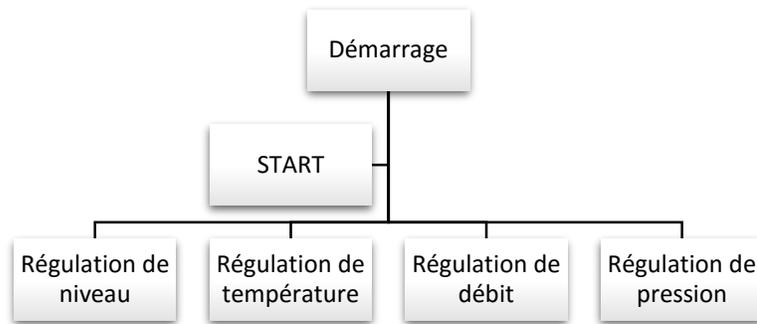


Figure IV.12 Démarrage du programme et choix de la régulation

### IV.3.1.2 Boucle de régulation de niveau

Pour le réglage de niveau il faut d'abord recevoir la mesure de la part du capteur de niveau, la valeur est transmise à l'automate sous forme d'une tension standard (0...10V), on traite cette valeur avec la fonction FC105.

Pour la régulation de niveau, on n'a pas d'autres choix que la pompe comme actionneur.

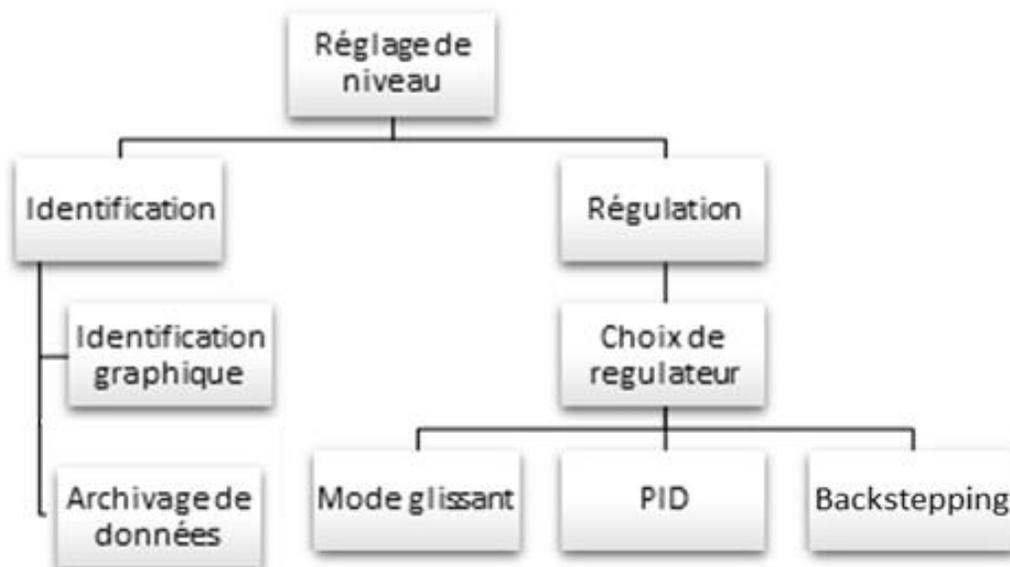


Figure IV.13 Organigramme de la régulation de niveau

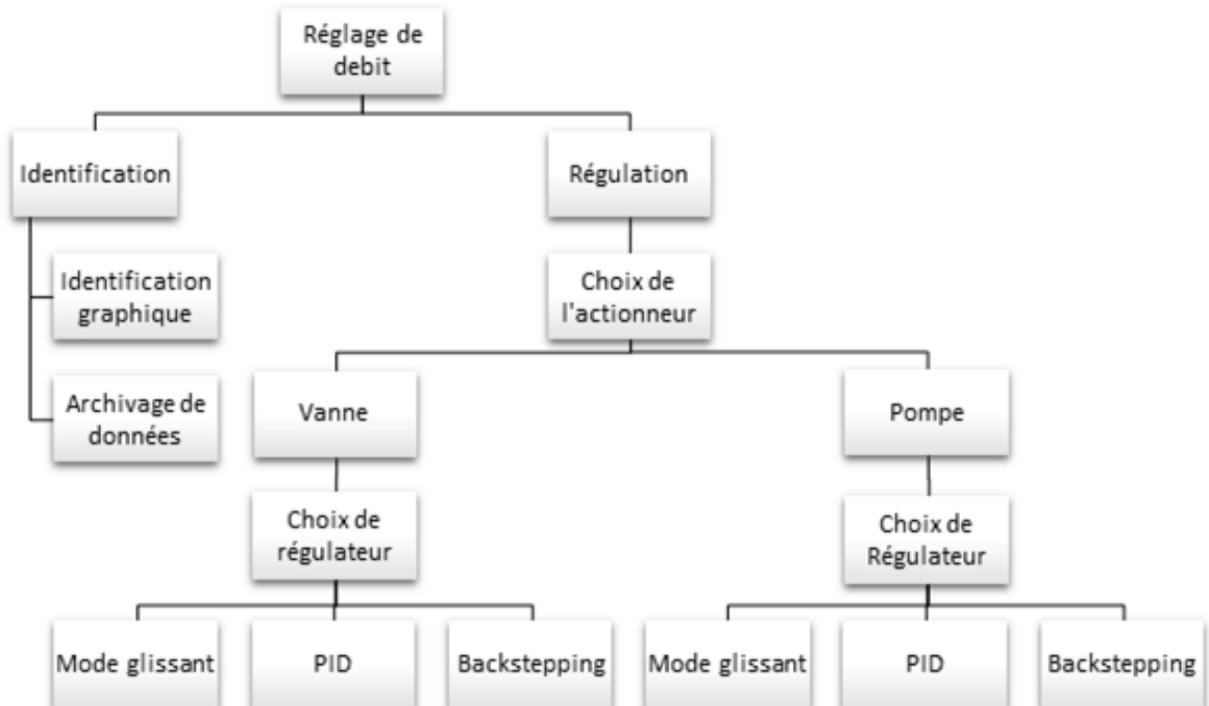
### IV.3.1.3 Boucle de régulation de débit

Si maintenant le choix est la régulation de débit, plusieurs configurations s'offrent à nous, l'avantage de cette régulation c'est que la pompe et la vanne proportionnelle se trouvent dans la boucle, donc on peut soit utiliser la pompe en mode analogique comme actionneur ou bien la faire fonctionner à une puissance constante en utilisant la vanne comme actionneur. Cette fois le

## Chapitre IV : Application

---

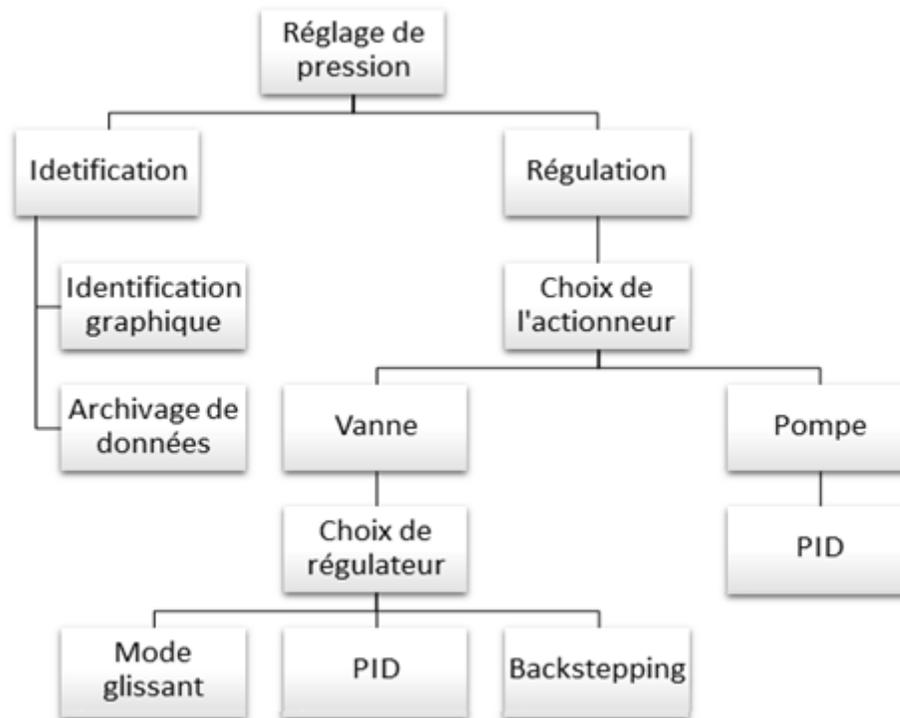
programme reçoit donc le type de régulation ainsi que le choix de l'actionneur, et selon ces derniers il choisira le régulateur approprié et il générera la commande désirée.



**Figure IV.14 Organigramme de la régulation du système de contrôle de débit**

### IV.3.1.4 Boucle de régulation de pression

Contrairement à la régulation de débit, dans la régulation de pression il est préférable d'utiliser la vanne comme actionneurs. La régulation de pression avec la pompe n'est pas convenable puisque nous n'avons pas pu identifier le système de régulation pression-pompe et donc nous n'avons pas pu synthétiser d'autres lois de commande mise à part le régulateur PID.

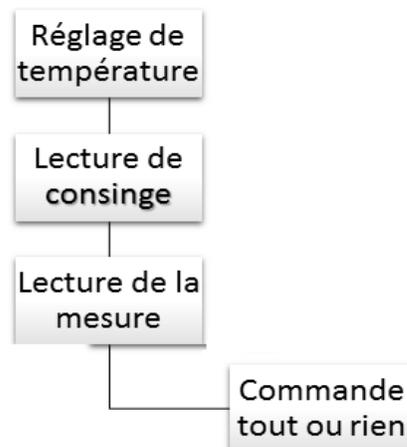


**Figure IV.15 Organigramme de la régulation du système de contrôle de pression**

### IV.3.1.5 Boucle de régulation de température

Le système de régulation de température est très lent, une régulation toute ou rien remplira largement les objectifs de commande. Pour cette régulation le programme reçoit seulement la consigne, l'algorithme de régulateurs n'est qu'un comparateur.

L'organigramme ci-dessous montre la structure du programme :



**Figure IV.16 Organigramme de la régulation du système de contrôle de température**

## Chapitre IV : Application

---

### IV.3.2 Blocs de programmation

Dans l'outil de programmation STEP 7, on dispose de plusieurs plateformes permettant de rendre l'implémentation de la commande moins complexe, et de créer des blocs de données sans mémoire physique, ce qui nous donne la possibilité de créer autant de variables intermédiaires qu'on souhaite.

Dans cette partie nous allons présenter les blocs de programme utilisés et leurs différentes parties.

#### IV.3.2.1 Le bloc d'organisation principal OB1

Le bloc d'organisation OB1 constitue l'interface entre le système d'exploitation et le programme élaboré, il est appelé par le système d'exploitation qui gère le traitement du programme cyclique, ainsi que la mise en route de l'automate programmable et le traitement des erreurs.

Dans notre application le bloc OB1 contient les éléments suivant :

- Une fonction SCALE FC105 pour chaque système : elle effectue la mise à l'échelle de la valeur reçue par les différents capteurs, elle renvoie une valeur en pourcentage ;
- Un identificateur pour chaque système : cette variable permet d'activer la régulation du système désiré ;
- Une entrée qui permet d'activer la sortie START, et de lancer la régulation, ou bien de la désactiver ;
- Le bloc FB1.

#### IV.3.2.2 Le bloc fonctionnel FB1

Notre bloc FB1 contient les éléments suivant :

- La lecture des différentes mesures à partir des capteurs, qui sont fournies par la fonction SCALE et qui sont utilisées dans la visualisation dans l'interface WinCC ;
- La variable CHOIX VANNE : elle permet la configuration de la vanne comme actionneurs, de plus que la mise à '1' de cette variable, elle permet aussi l'activation du mode booléen de la pompe, et la faire fonctionner avec une puissance constante ;
- La variable CHOIX POMPE : elle active la pompe en mode analogique ;
- Le bloc de transfert : il transmet la commande générée à la variable POMPE, cette opération ne se déroulera que si la variable CHOIX POMPE est à '1' ;
- Le bloc de transfert permettant de transmettre la valeur de la commande à la variable VANNE, cette opération ne se déroulera que si la variable CHOIX VANNE est à '1' ;

## Chapitre IV : Application

- Un premier bloc UNSCALE : permet de transmettre la valeur stockée dans la variable POMPE à la sortie physique qui correspond à la pompe, cette opération déroulera seulement si la variable START est à '1' et la variable CHOIX POMPE est à '1' ;
- Un deuxième bloc UNSCAL : permet de transmettre la valeur stockée dans la variable VANNE à la sortie physique qui correspond à la vanne, cette opération ne se déroulera que si la variable START et la variable CHOIX VANNE sont à '1'.

### IV.3.2.3 Le bloc d'organisation cyclique OB35

Notre bloc OB35 contient les éléments suivant :

- Le bloc de régulation FB41 : dans notre application ce bloc est configuré en programmation, il peut être appelé dans toutes les boucles de régulation.
- Le régulateur Mode glissant : il est programmé dans un fichier source de STEP 7 ;
- Le régulateur Backstepping : il est programmé dans un fichier source de STEP 7.

(Les différents blocs présentés dans cette partie et leurs contenus se trouvent dans l'annexe F).

#### Remarque :

Deux régulateurs ne peuvent fonctionner en même temps, donc chaque régulateur possède une configuration de variables propres à lui, la table ci-dessous montre les configurations nécessaires pour chaque régulation.

**Tableau IV-1 Configuration des variables pour chaque régulation**

		CHOIX							
		PID	MG	BS	NIVEAU	PRESSION	DEBIT	VANNE	POMPE
REGULATEUR	PID_NIVEAU	1	0	0	1	0	0	0	1
	MG_NIVEAU	0	1	0	1	0	0	0	1
	BS_NIVEAU	0	0	1	1	0	0	0	1
	PID_DEBIT_POMPE	1	0	0	0	0	1	0	1
	PID_DEBIT_VANNE	1	0	0	0	0	1	1	0
	MG_DEBIT_POMPE	0	1	0	0	0	1	0	1
	MG_DEBIT_VANNE	0	1	0	0	0	1	1	0

## Chapitre IV : Application

BS_DEBIT_POMPE	0	0	1	0	0	1	0	1
BS_DEBIT_VANNE	0	0	1	0	0	1	1	0
PID_PRESSION_POMPE	1	0	0	0	1	0	0	1
PID_PRESSION_VANNE	1	0	0	0	1	0	1	0
MG_PRESSION_VANNE	0	1	0	0	1	0	1	0
BS_PRESSION_POMPE	0	0	1	0	1	0	0	1

### IV.4 Description de l'interface WinCC

Dans cette partie, nous allons présenter la supervision réalisée avec ce logiciel. La conception de l'interface a pour but de permettre aux utilisateurs de toucher les différentes fonctionnalités du projet, afin de manipuler un travail de régulation complet en balayant toutes les étapes nécessaires. Tout le travail établi jusqu'à cette étape a été inclus dans cette interface.

Notre programme contient cinq fenêtres ; chaque fenêtre est interactive et possède des boutons permettant aux utilisateurs d'accéder à des options multiples.

#### IV.4.1 Vue principale

Cette vue contient tous les composants de la station, elle permet de visualiser l'état des capteurs et actionneur en temps réel, de plus cette fenêtre possède cinq boutons permettant l'accès à toutes les régulations possibles.

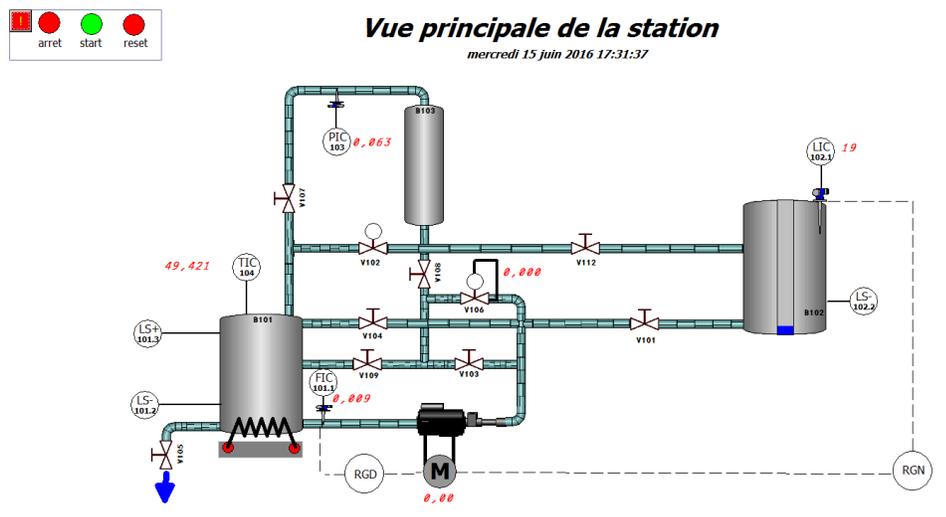


Figure IV.17 Vue principale

## Chapitre IV : Application

La fenêtre possède les boutons suivant :

- RGN : ce bouton permet d'accéder au réglage de niveau.
- RGD : il permet d'accéder au réglage de débit.
- TIC : il permet d'accéder au réglage de température.
- PIC : il permet d'accéder au réglage de pression.
- Bouton des alarmes : il permet d'accéder aux alarmes, ces dernières sont configurées pour empêcher un dépassement des limites du système, qui peuvent engendrer des dégâts humains ou matériels.

### IV.4.2 Les vues des réglages

Ces vues permettent de choisir entre le réglage et l'identification du système. Elles proposent aussi un tracé de la consigne, la mesure et la commande. Chacune de ces vues contient deux boutons :

- BO : ce bouton permet de tracer la réponse en boucle ouverte ou d'effectuer un archivage des données pour une identification plus précise.
- BF : ce bouton permet le réglage en boucle fermée, et donc permet d'accéder aux choix de régulateur et de contrôleur.

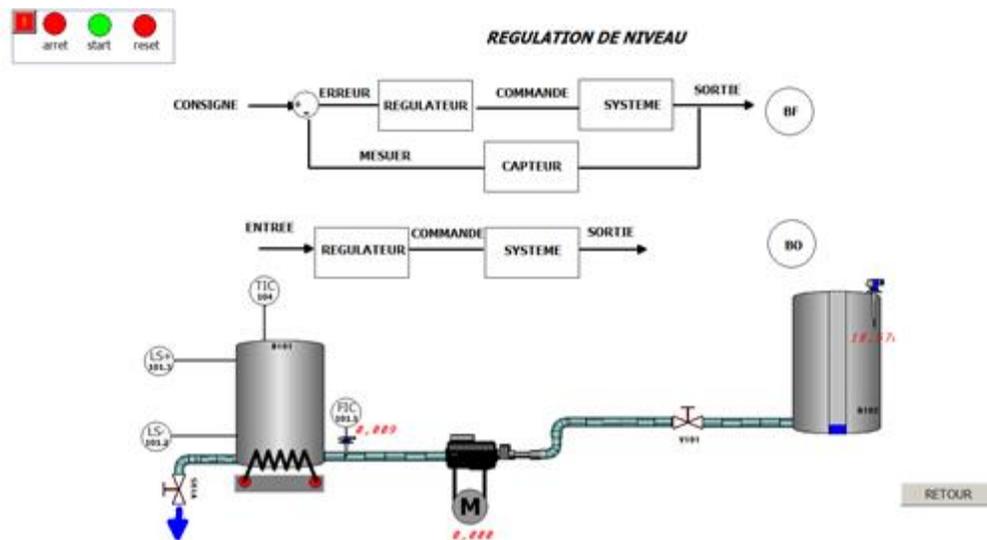


Figure IV.18 Vue relative à la régulation de niveau

# Chapitre IV : Application

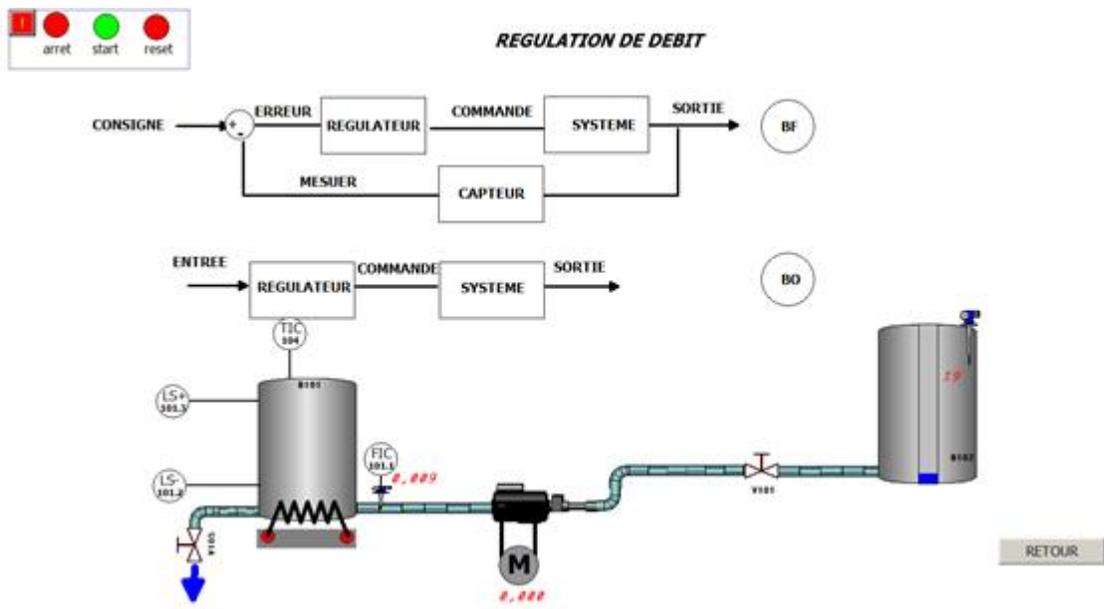


Figure IV.19 Vue relative à la régulation de débit

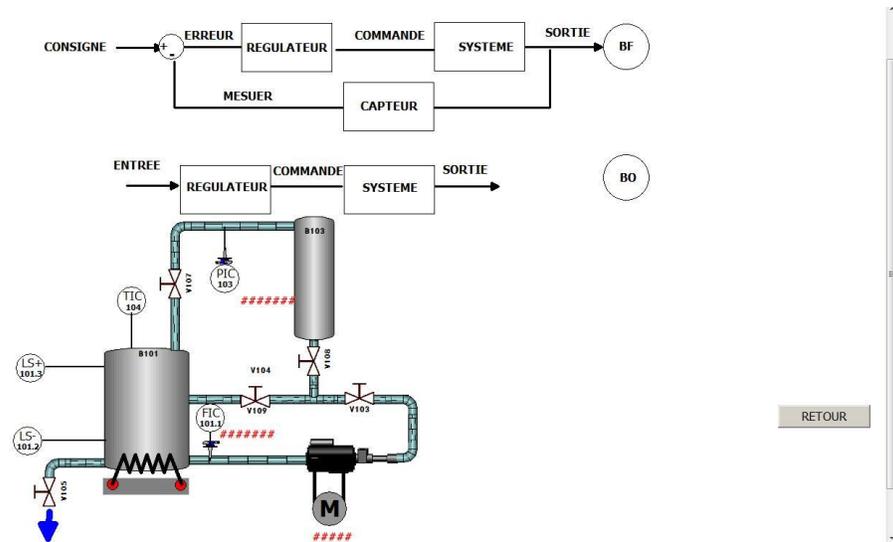


Figure IV.20 Vue relative à la régulation de pression

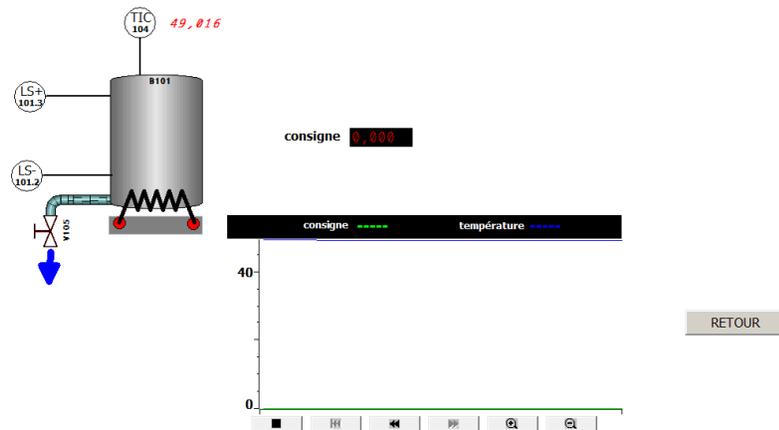


Figure IV.21 Vue relative à la régulation de température

## IV.4.3 La vue des alarmes

La vue des alarmes permet de signaler les erreurs qui peuvent endommager l'installation.

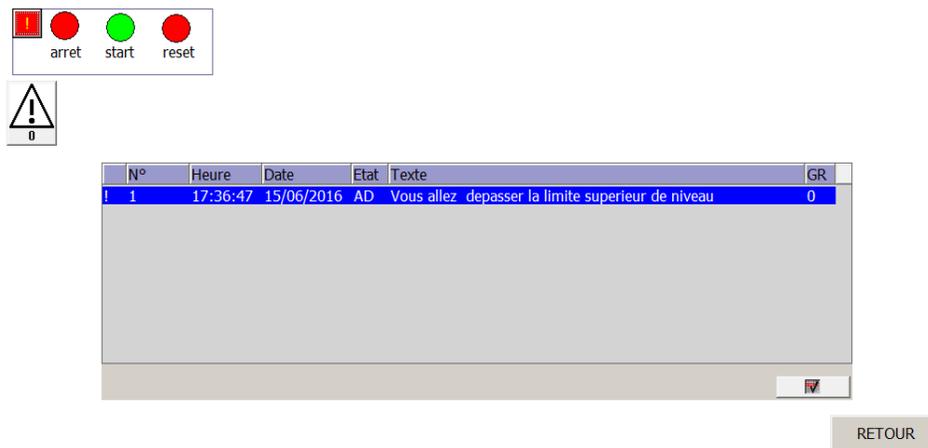


Figure IV.22 Vue d'alarme relative à un dépassement de limite de niveau

## Chapitre IV : Application

---

### IV.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'aspect logiciel de notre travail, qui se résume à la création d'une application qui mette en pratique la théorie déjà développé dans les chapitres précédents.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons élaboré un programme en utilisant STEP7 permettant de faire la régulation des différentes boucles constituant l'installation, ensuite nous avons présenté notre programme de gestion qui a été établi dans le but de faciliter la manipulation des différentes grandeurs de la station.

# Conclusion générale

Durant notre projet, nous avons manipulé un automate SIEMENS avec le moyen des deux logiciels SIMATIC, dans le but de commander les différents systèmes de contrôle présents dans l'installation de la station d'apprentissage didactique FESTO.

La réalisation de ce travail nous a permis de mettre en pratique les concepts théoriques de l'identification, afin de déterminer les modèles mathématiques de chaque système de contrôle, ensuite nous avons entamé la régulation en commençant par le réglage de niveau, pour ce dernier nous avons constaté que les réglages par Mode de glissement et Backstepping donnent de meilleurs résultats que le PID car ils sont meilleurs pour prendre en charge les non linéarités présentes dans la boucle de régulation de niveau. La représentation de cette boucle par une model non linéaire sera donc plus robuste et introduira moins d'erreurs de modélisation.

Nous avons entamé ensuite la régulation de débit et nous avons proposé deux stratégies de régulation ; la première consiste à utiliser la pompe comme actionneur et dans la deuxième elle travaille avec un débit constant, la vanne étant considérée comme l'élément de réglage. Cette régulation le PID suffit largement pour établir la poursuite et annuler l'erreur statique. Ensuite nous avons régulé la pression avec la pompe et avec la vanne, nous avons constaté que le réglage avec la vanne est plus convenable car la commande est plus régulière. Finalement, nous avons élaboré une application de gestion qui facilite le contrôle et la supervision de la station.

Notre contribution s'est porté sur l'identification, la commande avancée et la mise en place d'un programme de gestion afin de faciliter la manipulation des quatre systèmes de contrôle (niveau, débit, pression, température) disponible sur la station ; et ce pour servir de base de départ à d'éventuels travaux pratiques et projets de fin d'études.

A l'issue de ce travail, nous proposons comme perspectives :

- L'ajout d'un convertisseur qui permettra la commande analogique de la température.
- Le diagnostic de l'installation à l'aide de l'outil de SIMATIC « S7 PDIAG ».

# Bibliographie

- [1] J.HELMICH, «Compact workstation manual », FESTO, 2004.
  
- [2] M.BERTRAND, « Automates programmables industriels », Technique de l'ingénieur, Vol. S 8 015.
  
- [3] SIEMENS, « Programmer avec STEP 7 », SIMATIC, référencé 6ES7810-4CA08-8CW0, 2006
  
- [4] SIEMENS, « PLC S7-300, CPU spécifications », SIMATIC, 2001
  
- [5] SIEMENS, « S7-300 and M7-300 Programmable controleurs module specifications », SIMATIC, 2001
  
- [6] SIEMENS, « Technique de régulation avec STEP7 », SIMATIC, 2004
  
- [7] SIEMENS, « WinCC Getting started », SIMATIC HMI, 2008.
  
- [8] SIEMENS, « WinCC V6.0 Documentation de base », SIMATIC HMI, 2003.
  
- [9] M.NOUGARET, « Principes généraux de correction ».
  
- [10] SIMATIC HMI, « WinCC flexible 2008 Compact/Standard/Advanced » référencé 6AV6691-1AB01-3AC0.
  
- [11]Langages de programmation pour systèmes automatisés : norme CEI 61131-3.
  
- [12]AYAB Ahmed, KHIAR Ilyes, « Etude et la réalisation de la supervision de l'alimentation du siège OTA, Juin 2014.

## Bibliographie

---

- [13] ABRICHE Anissa, BELKAS Salah-eddine, « Réalisation et gestion d'un prototype de station de pompage à base d'API SIEMENS », 2007.
- [14] OUKACINE Sadia, Mémoire de MAGISTAIR, « Identification des système non linéaires », 2012.
- [15] SOUCHANE Amine, SAHAR Belkacem, « Commande et supervision de la station FESTO », Juin 2009
- [16] « Les automates programmables »,  
[http://www.groupeisf.net/Automatismes/Automatesprogrammables/API\\_ATTOL/Bases\\_automatismes/an9\\_seq1\\_Place\\_et\\_role\\_de\\_l\\_API.ppt](http://www.groupeisf.net/Automatismes/Automatesprogrammables/API_ATTOL/Bases_automatismes/an9_seq1_Place_et_role_de_l_API.ppt)

# Annexes

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

### A.1 Capteurs

#### A.1.1 Capteurs analogiques

##### A.1.1.1 Capteur ultrasonique de niveau



**Figure A.1 Capteur ultrasonique de niveau**

Le principe de fonctionnement du capteur ultrasonique est basé sur la génération d'ondes acoustiques et sur la détection de leurs réflexions sur les différents objets présents sur leur chemin.

En effet, un générateur d'ondes acoustiques est actionné pendant un certain laps de temps et émet donc des impulsions ultrasoniques inaudibles à l'oreille humaine. Ces ondes émises se réfléchissent sur des objets et l'écho de retour est ainsi détecté par un récepteur. Le temps mis entre l'émission et la réception d'une onde acoustique est évalué électroniquement. Le signal de sortie (courant électrique) n'est proportionnel au temps de parcours de l'impulsion ultrasonique, que dans une certaine plage de mesure.

Avec ce type de capteur deux types de setup sont possibles qui correspondent à deux types de mesure différentes :

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

- Mesure de la distance entre le capteur et un objet (setup MANUFACTURER) ;
- Mesure de niveau (setup ADIRO).

Le capteur disponible dans l'installation nous permet une mesure de niveau, il fonctionne suivant le setup ADIRO, ce dernier fait affecter au niveau maximum un signal de sortie (courant électrique) maximum, et respectivement un signal de sortie minimum correspond au niveau minimum.

Le capteur délivre donc un signal de sortie sous forme de courant (4...20mA), ce dernier passe par un convertisseur courant tension (0...10V) afin d'être transmis à l'automate.

Le capteur est positionné dans un réservoir à 330 mm du fond, la distance qui le sépare des murs de ce dernier doit être de 75mm.

Les caractéristiques techniques du capteur sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-1 Caractéristiques techniques du capteur de niveau**

Paramètre	Caractéristique
Classe de protection	IP 67
Poids	67g
Température ambiante	-25 à 70°C
Précision	+ ou + 2.5%
Courant idéal de consommation IO	<50mA
Sortie analogique	
Plage de courant	4...20mA
Plage de mesure	0...300mm

### A.1.1.2 Capteur fréquentiel de débit



**Figure A.2 Capteur de débit**

Le liquide transparent est admis et guidé, dans un mouvement circulaire, à l'intérieur d'une chambre de mesure, de ce fait le liquide actionne un mini rotor à trois ailettes. La vitesse du rotor

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

est proportionnelle à celle de l'écoulement, et elle est détectée par le biais d'un système optoélectronique à infrarouges.

Le capteur délivre, sous la forme d'une onde carrée, un signal qui peut être mesuré avec un oscilloscope. Ce dernier est soit directement transmis comme entrée binaire à l'automate programmable, soit transmis par le biais d'un convertisseur fréquence/tension (0...10V).

Les caractéristiques du capteur sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-2 Caractéristiques du capteur de débit**

Paramètre	Caractéristique
Plage de fréquence (signal de sortie)	40...1200Hz
K-facteur	8000
Plage de mesure	0...7.5 l/min
Fiabilité de la mesure	+/- 1% de la valeur mesurée
Pression opérationnelle	10 bar au maximum
Plage de température standard	-40...+80 °C
Connexions électriques	Câbles

### A.1.1.3 Capteur de pression piézorésistif



**Figure A.3 Capteur de pression**

Le capteur de pression analogique est un capteur de pression relative piézorésistif, avec un amplificateur intégré et muni d'un compensateur de température, le tout dans un corps en aluminium.

La pression à mesurer agit sur l'élément piézorésistif, créant ainsi un signal qui est émis à travers l'amplificateur sous la forme d'un signal standard 0...10V.

Les caractéristiques techniques sont ainsi résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-3 Caractéristiques technique du Capteur de pression**

<b>Paramètre</b>	<b>Caractéristique</b>
Plage de mesure	0...400 mbar
Signal de sortie	0...10VDC
Courant de consommation	5 mA au maximum
Temps de réponse	1 ms
Plage de température standard	0...65°C
Connexions électriques	Plug 3-PIN
Poids	250g

**A.1.1.4 Le capteur de température**



**Figure A.4 Capteur de température**

Le principe du capteur de température est basé sur le changement de la valeur de la thermo-résistance le constituant en fonction de la température. Le capteur est constitué d'un bouclier sous forme de tube, d'une tête de connexion et d'un élément de mesure (thermo-résistance de type PT100).

La valeur de la résistance passe par un convertisseur PT100/tension (0...10V) avant d'être transmise à l'API.

Les caractéristiques techniques du capteur sont les suivantes :

**Tableau A-4 Caractéristiques technique du capteur de température**

<b>Paramètre</b>	<b>Caractéristique</b>
Design	DIN 43 763
Plage de mesure	0...+100°C
Tolérance 0°C 100°C	+/- 0.12 Ω +/- 0.30 Ω
Connexion électrique	Câble de longueur de 750 mm

### A.1.2 Capteurs digitaux

#### A.1.2.1 Les Détecteurs de proximité capacitifs



**Figure A.5 Détecteur de proximité capacitif**

Le principe de fonctionnement d'un capteur capacitif de proximité est basé sur l'évaluation de la variation de la capacité d'un condensateur dans un circuit RC résonant. En effet l'augmentation de la valeur de la capacité, due au rapprochement d'un objet, mène à un changement de l'oscillation du circuit RC.

La variation de la capacité dépend principalement de la distance, des dimensions et de la constante diélectrique du matériau détecté.

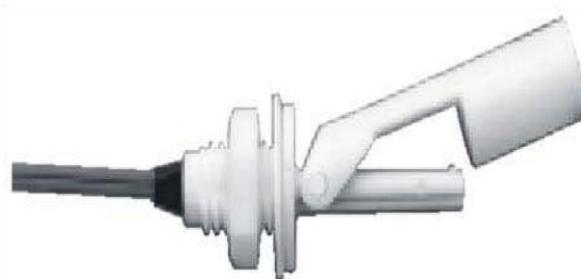
La sortie du capteur est un transistor PNP utilisé en commutation sous la forme d'un contact normalement ouvert.

Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-5 Caractéristiques technique du détecteur de proximité**

<b>Paramètre</b>	<b>Caractéristique</b>
Distance nominale de fonctionnement	2...8 mm
Courant de commutation maximum	200 mA
Fréquence de commutation maximum	300 Hz
Courant de consommation en fonctionnement lent	7 mA
Température ambiante admissible	20...70°C
Degré de protection	IP 65
Poids	0.20 kg
Connexion électrique	Câble, 2000 mm de longueur

### A.1.2.2 Les flotteurs



**Figure A.6 Flotteur**

Le principe de fonctionnement est simple, étant donné que le flotteur est destiné à être monté sur le mur latéral d'un réservoir. Le mode d'action est simple et basé sur la variation du niveau du liquide. L'aimant intégré dans le corps du flotteur active un interrupteur hermétiquement isolé.

Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-6 Caractéristiques technique du flotteur**

Paramètre	Caractéristique
Température	-40...121°C
Densité du liquide minimum	0.8
Pression opérationnelle	7bar
Protection DIN40050	IP64
Poids (approximatif)	80g

### A.1.2.3 Flotteur anti-débordement



**Figure A.7 Flotteur anti-débordement**

Le liquide en montant pousse vers le haut l'élément flotteur et actionne ainsi un interrupteur, Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-7 Caractéristiques techniques du flotteur anti-débordement**

<b>Paramètre</b>	<b>Caractéristique</b>
Profondeur d'immersion du corps flottant (densité 1)	15 mm
Densité minimale du liquide	0.75
Protection DIN 40050	IP64
Poids	20g
Pression opérationnelle	3 bar

## **A.2 Les actionneurs**

### **A.2.1 Actionneurs analogiques**

#### **A.2.1.1 La pompe**



**Figure A.8 Pompe centrifuge**

La pompe est une pompe centrifuge à eau, le moteur de la pompe est adapté pour un fonctionnement en continu.

Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-8 Caractéristiques techniques de la pompe**

<b>Paramètre</b>	<b>Caractéristique</b>
Pompe	Plastique (PPA, GF 30%)
Arbre de transmission	Acier inoxydable
Plaque d'usure	Acier inoxydable
Joint annulaire	EPDM
Roue à lames	Corps : plastique (PPA, GF 40%) Matériaux magnétiques : ferrite

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

Moteur à bride	Plastique (PA, GF 30%)
Boitier du moteur	Plastique (PA, GF 30%)
Vis	Acier
Moteur	Moteur à aimant permanent 12/24V
Support du moteur	Aluminium
Classe de protection	IP67 (DIN 40050)
Plage de température	
Fluide	-40...100°C
Ambiante	-40...70°C
Pression maximale	2.5 bar
Tension d'alimentation	24V
Puissance	26W

### A.2.1.2 Vanne proportionnelle

La vanne proportionnelle facilite le contrôle continu du débit des fluides et gaz neutres. Elle est actionnée directement, à travers un élément de contrôle électronique (1), par une électrovalve (vanne + solénoïde) 2/2 voies (2).

Le principe est que le piston de la vanne est soulevé de son siège par l'intermédiaire d'un électroaimant, et libère ainsi l'écoulement à travers la vanne à un débit proportionnel à la surface ouverte.



**Figure A.9 Vanne proportionnelle**

Les caractéristiques techniques de sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-9 Caractéristiques techniques de la Vanne proportionnelle**

Paramètre	Caractéristique
Puissance de consommation (solénoïde)	8W
Signal d'entrée	0...10V

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

Type d'action	Opération en continu
Degré de protection	IP 64f
Taille nominale	6mm
Pression opérationnelle	0...0.5 bar
Température opérationnelle	55°C au maximum
Sensibilité de la réponse	0.5% de la valeur finale
Précision dans la répétition	0.5% de la valeur finale
Fluides	Eau, air comprimé
Matériels Extérieur de la vanne Intérieur de la vanne Joint	Laiton Acier inoxydable FPM
Dimensions Hauteur avec le contrôleur électronique Longueur	108mm 46mm
Connexions électriques	Pin pour le contrôleur électronique

Les caractéristiques techniques du contrôleur électronique sont quant à eux résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-10 Caractéristiques techniques du contrôleur électronique de la vanne**

Paramètre	Caractéristique
Tension d'alimentation admissible	24...28VDC au maximum
Ondulation résiduelle	10% au maximum
Signal d'entrée	0...10V
Résistance d'entrée	16.8k $\Omega$
Consommation en puissance	0.5W
Consommation en courant à 24V	18mA
Température opérationnelle	0...55°C
Matériel	Plastique
Connexions électriques	Câble de 7mm raccordé au terminal

## A.2.2 Actionneurs digitaux

### A.2.2.1 Résistance chauffante

L'unité de chauffage est alimentée avec une tension 230VAC, elle est activée et désactivée par le biais d'un relais fonctionnant quant à lui par une tension de 24VDC.



Figure A.10 Résistance chauffante

Les caractéristiques techniques sont les suivantes :

Tableau A-11 Caractéristiques techniques de la résistance chauffante

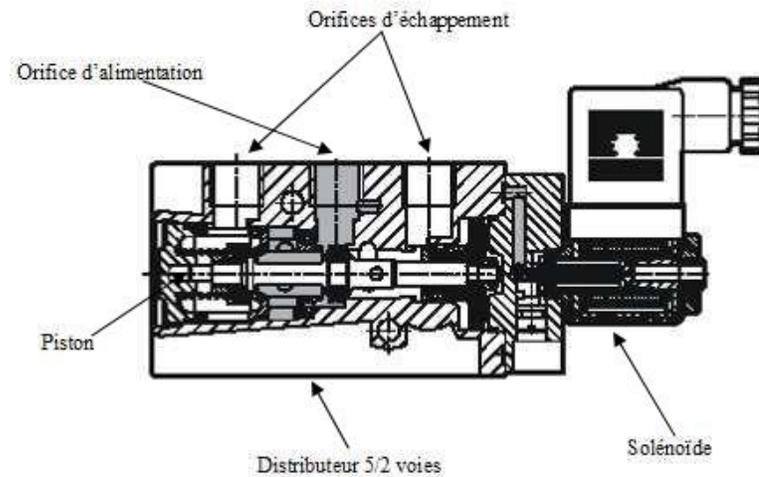
Paramètre	Caractéristique
Consommation	1000W/203VAC
Tension de contrôle	0...10V
Matériels (boîtier, élément chauffant)	Acier inoxydable
Connexions Unité de chauffage Connexion de contrôle	Câble avec un Plug de 2000mm de longueur 3 pins

### A.2.2.2 Vanne automatique tout ou rien

Cet équipement de contrôle consiste en une vanne à billes en cuivre ouverte/fermée par un actionneur quart de tour à double effet de type SYPAR, contrôlé par une électrovanne 5/2 voies de type NAMUR.

#### A.2.2.2.1 Electrovanne de type NAMUR

L'électrovanne est constituée par un distributeur pneumatique 5/2 voies (1), actionnée par un électroaimant (Solénoïde + piston) (2).



**Figure A.11** Electrovanne de type NAMUR

Les caractéristiques techniques du solénoïde sont les suivantes :

**Tableau A-12** Caractéristiques techniques du solénoïde

Paramètre	Caractéristique
Alimentation	24VDC
Ondulation admissible de la tension	+/-10%
Consommation en puissance	5.65 W
Classe de protection EN 60 529	IP 65
Connexion électrique	Câble moulé 3x0.75 longueur 1m à 5m
Température ambiante	-5...40°C
Temps de ramassage minimum	12ms
Matériels	Acier, cuivre...
Poids	0.175kg

**A.2.2.2.2 Semi-disque rotatif type SYPAR**



**Figure A.12** Semi-disques rotatifs type SYPAR

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

Cet équipement est utilisé essentiellement pour des vannes avec angle de rotation limité à 90°, c'est l'actionneur double effet quart de tour de la vanne à billes, muni d'un port pattern de type NAMUR (2).

Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-13 Caractéristiques techniques du semi-disque rotatif type SYPAR**

Paramètre	Caractéristique
Dimensions	50 mm
Milieu	Air sec, avec ou sans huile, ou gaz compatible avec les actionneurs hydraulique
Consommation (volume) par cycle	0.06l/cycle
Temps de commutation	
Ouverture	0.04 s
Fermeture	0.04 s
Température opérationnelle	-20...80°C
Poids	0.75g

Les pressions nécessaires au bon fonctionnement du semi-disque rotatif sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau A-14 Pressions de fonctionnement**

Paramètre	Valeur
Pression de fonctionnement en repos	0.4 bar
Pression de fonctionnement en travail	0.25 bar
Pression opérationnelle minimale	1 bar
Pression opérationnelle nominale	5.6 bar
Pression opérationnelle maximale	8.4 bar

### A.2.2.2.3 Indicateur de positions



**Figure A.13 Indicateur de positions**

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

L'indicateur de position consiste en deux micro-interrupteurs électriques avec levier à roulement. Les caractéristiques techniques sont les suivantes :

**Tableau A-15** Caractéristiques techniques de l'indicateur de position

Paramètre	Caractéristique
Élément de commutation	Contact normalement fermé
Tension d'alimentation	0...30 VDC
Plage de température	-25...100°C
Classe de protection	IP65

### A.3 Le terminal de conversion des signaux analogiques :

Le terminal de conversion des signaux analogiques est constitué de plusieurs types de convertisseurs analogiques, qui permettent, d'un côté, de convertir les signaux envoyés par les différents capteurs analogiques constituant l'installation en signaux standard 0...10V et d'un autre côté de transformer les signaux analogiques envoyés par l'API vers les éléments de contrôles en signaux standard 0...24V ou 0...10V.

#### A.3.1 Les convertisseurs

##### A.3.1.1 Convertisseur PT100/tension :



**Figure A.14** Convertisseur PT100/tension

Ce convertisseur transforme la valeur de la résistance PT100 en une tension standard 0...10V, la plage de transformation est de 0...100°C. Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-16** Caractéristiques techniques du convertisseur PT100/tension

Paramètre	Caractéristique
Plage de température	0...100°C

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

Alimentation en tension	DC 24V (+/-10%)
Courant nominal	30A
Sortie	0...10V
Charge	500kOhm
Erreur de transmission	0.3%
Température ambiante permissible	0...55°C
Poids	29.8g
Couleur	Grise

### A.3.1.2 Convertisseur courant/tension :



**Figure A.15 Convertisseur courant/tension**

Ce convertisseur transforme la valeur (courant) transmise par le capteur de niveau ultrasonique en tension standard 0...10V. Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-17 Caractéristiques techniques du convertisseur courant/tension**

Paramètre	Caractéristique
Signal d'entrée	4...20 mA
Courant d'entrée	22 mA
Résistance d'entrée	< 400kOhm
Chute de tension en ligne maximum	< 8V
Signal de sortie	0...10V
Charge	>2kOhm
Détection de fil cassé	LED verte éteinte
Température ambiante permissible	0...55°C
Couleur	Grise

### A.3.1.3 Convertisseur fréquence/tension



**Figure A.16** Convertisseur fréquence/tension

Ce convertisseur transforme la valeur (fréquence) transmise par le capteur de débit fréquentiel en tension standard 0...10V. Les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-18** Caractéristiques techniques du convertisseur fréquence/tension

Paramètre	Caractéristique
Température ambiante permissible	55°C
Alimentation en tension	20,30VDC
Consommation en courant	12mA
Sortie	
Signal de sortie	0...10V
Charge	>2kOhm
Couleur	Grise

### A.3.2 Le contrôleur du moteur de la pompe



**Figure A.17** Contrôleur du moteur de la pompe.

Ce contrôleur permet de faire varier la tension d'alimentation du moteur de la pompe, et donc sa vitesse. Dans le circuit de bord il y'a un potentiomètre qui permet d'ajuster le contrôleur. Le

## Annexe A Caractéristiques techniques des composants de la station PCS

---

but de cet ajustement et de faire correspondre la tension 0V de l'entrée à celle de la sortie, et la tension 24V de sortie à une tension de 10V à l'entrée.



**Figure A.18** Circuit de bord du contrôleur du moteur de la pompe

Les caractéristiques techniques du contrôleur sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau A-19** Caractéristiques techniques du contrôleur du moteur de la pompe

Paramètre	Caractéristique
Tension opérationnelle permmissible	24VDC
Entrée	-10V...+10V
Sortie	-24V...+24V
Courant de sortie	1mA max
Connexion	Serrage à vis

## Annexe B Configuration relatives aux différentes boucles de régulation

**Tableau B-1 Tableau des configurations relatives aux différentes boucles de régulation**

<b>Composant</b>	<b>Système de contrôle de niveau</b>	<b>Système de contrôle de débit avec la pompe P101 comme actionneur</b>	<b>Système de contrôle de débit avec la vanne proportionnelle V106 comme actionneur</b>	<b>Système de contrôle de pression avec la pompe P101 comme actionneur</b>	<b>Système de contrôle de pression avec la vanne proportionnelle V106 comme actionneur</b>	<b>Système de contrôle de température</b>
<b>Point de mesure</b>	LIC102 B101	FIC101 B102		PIC103 B103		LIC104 B104
<b>Pompe P101</b>	Elément de contrôle	Elément de contrôle	Mode binaire on	Elément de contrôle	Elément de contrôle	Mode binaire on
<b>Vanne proportionnelle V106</b>	Off	Off	Elément de contrôle	Off	Elément de contrôle	Off
<b>Elément chauffant E104</b>	Off	Off	Off	Off	Off	Elément de contrôle
<b>Vanne manuelle V101</b>	Ouverte	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée

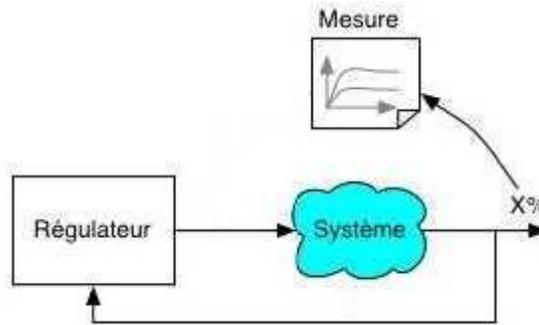
## Annexe B Configurations relatives aux différentes boucles de régulation

---

<b>Vanne automatique tout ou rien V104</b>	Ouverte/ Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée
<b>Vanne manuelle V103</b>	Fermée	Fermée	Fermée	Ouverte	Fermée	Ouverte
<b>Vanne manuelle V104</b>	Fermée	Ouverte	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée
<b>Vanne manuelle de drainage V105</b>	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée
<b>Vanne manuelle V107</b>	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée
<b>Vanne manuelle V108</b>	Fermée	Fermée	Fermée	Ouverte	Ouverte	Fermée
<b>Vanne manuelle V109</b>	Fermée	Fermée	Ouverte	Ouverte/ Fermée	Ouverte/Fermée	Ouverte
<b>Vanne manuelle V112</b>	Ouverte	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée	Fermée

## Annexe C Méthode de Ziegler Nichols

Cette méthode est basée sur l'analyse de la stabilité du système à contrôler. Elle consiste à analyser le système en présence d'un contrôleur *proportionnel pur*, et à déterminer le gain de ce contrôleur qui met le système à la limite de stabilité, en assurant une oscillation entretenue. On note le gain de ce contrôleur (gain critique) et la période de l'oscillation ( $T_0$ ).



**Figure C.1 Essai en limite de pompage**

On calcule les paramètres de réglage du contrôleur à partir des corrélations de Ziegler-Nichols rappelés dans le tableau suivant :

**Tableau C-1 Calcul des paramètres d'un régulateur PID par la méthode de Ziegler Nichols**

Type de contrôleur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{K_{cr}}{2}$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{K_{cr}}{2.2}$	$\frac{T_0}{1.2}$	-
<b>PID</b>	$\frac{K_{cr}}{1.7}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{8}$

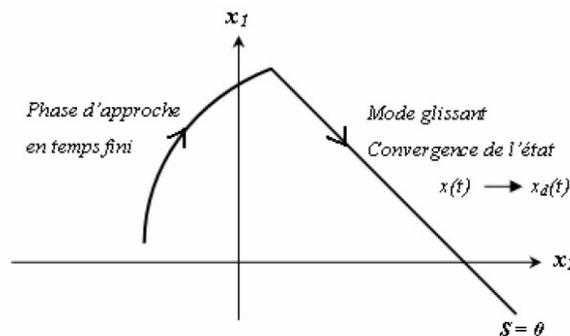
## Annexe D Mode de glissement

### D.1 Notions de base

La commande par mode glissant est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale de cette commande est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état du système utilisées pour créer une "variété" ou "hypersurface" dite de glissement. Le but est de forcer les états du système à vérifier l'équation de l'hypersurface, c'est à dire, ramener la trajectoire d'état sur cette hypersurface. Ceci se fait en deux phases :

Phase d'approche où la trajectoire d'état se rapproche de la surface de glissement jusqu'à l'atteindre. On l'appelle aussi phase d'attractivité.

Quand l'état est maintenu sur cette hypersurface, le système est dit en régime glissant (phase de glissement). Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation (dans une gamme qui reste plus large par rapport à celle des approches classiques de l'automatique), et à certaines perturbations.



**Figure D.1 Attractivité et maintien de l'état par la surface de glissement**

Cette commande possède des avantages incontestables tel que la robustesse (l'insensibilité) vis-à-vis des paramètres variables et les erreurs de discrétisation. Cependant, malgré les divers avantages, la commande par mode glissant possède également un inconvénient majeur qui a limité sa mise en œuvre au début de son apparition. En effet, si dans la théorie tout semble

possible et parfait, dans la pratique, les imperfections telles que les retards de commutation engendrent des oscillations autour de la surface de glissement pouvant exciter des dynamiques non modélisées, ce phénomène est appelé « phénomène de broutement » ou « chattering » en anglais.

### D.1.1 Le phénomène de chattering

Lors de la commande par la technique des modes glissants, un phénomène dit de réticence se passe, cela à cause de l'effet de commutation de la commande entre deux valeurs, si la fréquence de commutation est infinie c'est-à-dire une commutation très rapide ce phénomène sera réduit, mais à cause des retards et aussi la limitation par la technologie des actionneurs, le phénomène de réticence n'est plus annulé.

Le phénomène de réticence provoque alors des fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter des dynamiques non modélisées qui endommagent les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes ou même détériorer l'organe de commande.

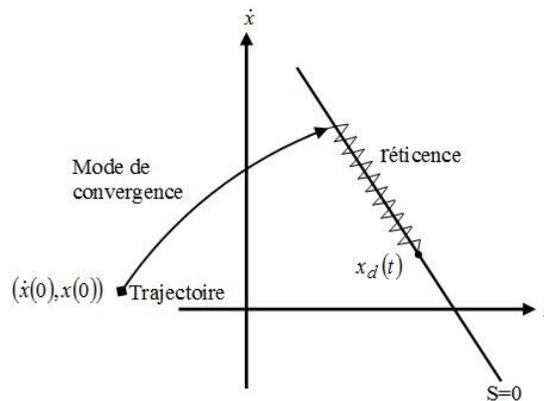


Figure D.2 Le phénomène de chattering

Afin de régler ce phénomène indésirable, plusieurs techniques ont été proposées, ce sont des techniques de limitation ou de saturation, sert à définir une zone autour de la surface  $S$  où à l'intérieur du quelle une condition de glissement moins stricte est appliquée à la place de la fonction signe.

### D.1.2 Conception de la commande par mode glissant

Soit le système décrit par l'équation :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u$$

Où :

$x(t) \in \mathcal{R}^n$  : Vecteur d'état.

$u(t) \in \mathcal{R}^m$  : Vecteur de commande.

$f(x) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  et  $g(x) \in \mathcal{R}^{n \times m}$  sont des fonctions non linéaires du vecteur d'état décrivant le système.

La mise en œuvre d'une commande par mode glissant passe par trois étapes :

- Le choix de la surface de glissement.
- Conditions d'existence et de convergence.
- L'établissement de la loi de commande.

#### III.1.2.1 Surface de glissement

La commande par modes glissants est calculée suivant la valeur des états du système à chaque instant. Cette loi de commande a pour but de conduire la trajectoire d'état de notre système non linéaire sur une surface pré spécifiée (choisie) et de maintenir cette trajectoire sur cette surface, appelée surface de commutation ou de glissement.

Le choix de cette surface n'est pas systématique mais une structure intéressante a été proposée par Slotine en 1990, elle a donné par :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(t)$$

Où :  $e$  : l'erreur de poursuite :  $e(t) = y(t) - y_r(t)$

$r$  : le degré relatif de la sortie  $y$ .

$\lambda$  : constante positive.

#### D.1.2.1 Conditions d'existence et de convergence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester

indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence :

### D.1.2.1.1 Attractivité de la surface de glissement

La tâche la plus importante est de synthétiser une commande qui conduira l'état du système sur la surface de glissement, cette phase est appelée phase attractive (reaching mode).

Lyapounov propose une approche, déjà utilisée pour l'étude de la stabilité d'un point d'équilibre, sans avoir à résoudre l'équation d'état du système.

Si on choisit comme fonction de Lyapunov, la fonction définie positive suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x)$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative.

Ceci n'est vérifiée que si la condition suivante est vérifiée.

$$\dot{S}(x)S(x) < 0$$

La fonction de Lyapunov vise à ce que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par  $S(x)$  diminue tout le temps, c'est à dire que l'état système sera attiré vers la surface de glissement, d'où le nom d'attractivité. Cette condition suppose un régime glissant idéal ou la fréquence de commutation est infinie.

### D.1.2.1.2 Invariance de la surface de glissement

La trajectoire d'état glisse sur la surface lorsque la condition suivante est satisfaite :

$$\dot{S}(x) = 0 \text{ pour } S(x) = 0$$

Ce mode invariant est assuré par la commande équivalente, qu'on va expliquer par la suite

### D.1.2.2 Développement de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à régler vers la surface, ensuite vers son point d'équilibre, en maintenant la condition d'existence du mode glissant.

## Annexe D Mode de glissement

---

Lorsqu'il y a un régime glissant, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande. De ce fait, on peut introduire une partie continue pour diminuer l'amplitude de la discontinuité, on aura donc :

$$u = u_c + u_{sq}$$

### D.1.2.2.1 Commande de commutation

La commande de commutation permettant de garantir la condition d'attractivité et responsable du glissement, la forme la plus simple que peut prendre est celle d'un relais.

$$u_c = \dot{S}(x) = -k \operatorname{sign}(S)$$

Où :  $k$  est une constante strictement positive qui représente le gain de la commande discontinue.

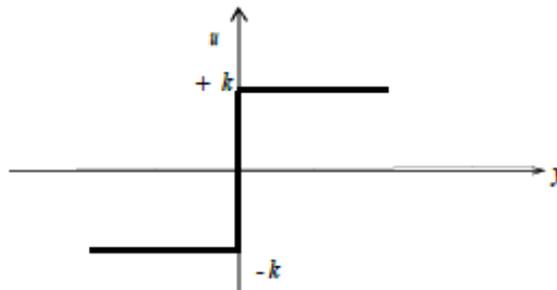


Figure D.3 Représentation de la commande discontinue

### D.1.2.2.2 Commande équivalente

La commande équivalente proposée par FILIPOV et UTKIN correspond à la commande du système nominale permettant de satisfaire la condition.

En effet, si nous considérons le système donné par l'équation ainsi que la commande de commutation :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x} f(x) + \frac{\partial S}{\partial x} g(x) = -k \operatorname{sign}(S)$$

D'où la loi de commande ;

$$u = \left( \frac{\partial S}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \left[ -\frac{\partial S}{\partial x} f(x) - k \operatorname{sign}(S) \right]$$

## Annexe D Mode de glissement

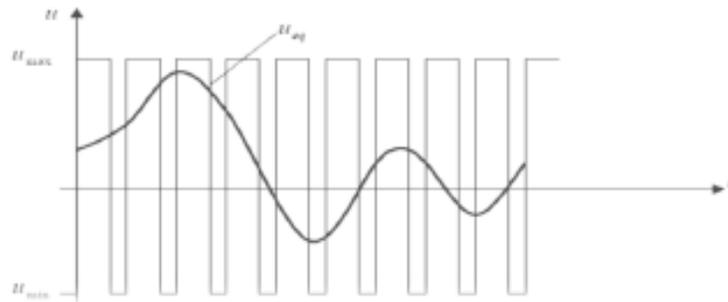
---

Sous la condition d'existence :  $\left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x)\right)$  inversible.

Pour satisfaire la condition d'invariance ;

$$u_{eq} = \left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x)\right)^{-1} \left[-\frac{\partial S}{\partial x} f(x)\right]$$

Cette commande peut être interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs  $u_{max}$  et  $u_{min}$



**Figure D.4 Représentation de la commande équivalente**

## Annexe E Les programmes sous STEP 7

### E.1 Le programme PID en SCL de l'exemple d'illustration

```

FUNCTION_BLOCK FB4
VAR_INPUT
  consigne, mesure, kp, ki, kd:REAL;// les entrées

END_VAR

VAR_OUTPUT
  sortie:REAL;//la commande
END_VAR
VAR
  somme_des_erreur:REAL;
  consigne_pre:REAL;
  sortie_calc, erreur, dif_des_erreur:REAL;
  val, valp, valpp, mesure_p, sortie_p:REAL;//variables statique

end_var
BEGIN
  // filtrage de la mesure
  mesure:=(mesure_p*EXP(-0.05/0.63))+(mesure*(1-(EXP(-0.05/0.63))));
  erreur:=consigne-mesure;//Définition de l'erreur
  val:=erreur;
  IF consigne = consigne_pre THEN// réinitialisation de l'action intégrale
    somme_des_erreur:=somme_des_erreur+ erreur;
  ELSE
    somme_des_erreur:=0;//integration par unité de temps
  END_IF;
  dif_des_erreur:=(val-valpp);//Dérivation multiplier par unité de temps
  sortie_calc:=kp*erreur + ki*somme_des_erreur+kd*dif_des_erreur;//commande
  IF sortie_calc < 0 THEN //
    sortie:=0 //
    ; //
  ELSIF sortie_calc > 100 THEN // saturation de la commande
    sortie:=100; //
    ; //
  ELSE //
    sortie:=sortie_calc; //
    ; //
  END_IF;
  valpp:=val;//Enregistrement de l'erreur précédente
  consigne_pre:=consigne;//Enregistrement de la consigne précédente
  mesure_p:=mesure;Enregistrement de la mesure précédente e
  sortie_p:=sortie;//Enregistrement de la sortie précédente
END_FUNCTION_BLOCK

```

### E.2 Les programmes de l'application

Les programmes présentés sur cette annexe sont des extraits des programmes principaux qui sont consultable dans la version électronique.

#### E.2.1 Le script d'archivage

```
1 'déclaration
2 Dim LastTime, StopTime, i, j, startTime, EndTime, per
3 Dim objExcel, strExcelPath, strSaveAsPath, objSheet
4 strExcelPath = "D:\niveau.xlsx"
5 strSaveAsPath = "D:\niveau.xlsx"
6
7 ' Ouvrez une feuille de calcul spécifiée et sélectionnez la première feuille de calcul.
8
9 Set objExcel = CreateObject("Excel.Application")
10 objExcel.Workbooks.Open strExcelPath
11 Set objSheet = objExcel.ActiveWorkbook.Worksheets(1)
12
13 i=2
14 startTime = Timer()
15 'la boucle d'écriture
16 Do
17 'Ecrire dans la première ligne la première colonne le mot consigne %
18 objSheet.Cells(1,1).Value="consigne %"
19 'Ecrire dans ligne i/la première colonne la valeur de la consigne
20 objSheet.Cells(i,1).Value=(SmartTags("pid_consigne")/3)
21 objSheet.Cells(1,2).Value="niveau %"
22 objSheet.Cells(i,2).Value=SmartTags("niveau_arch")
23 objSheet.Cells(1,3).Value="commande %"
24 objSheet.Cells(i,3).Value=SmartTags("commande")
25 objSheet.Cells(1,4).Value="entree %"
26 objSheet.Cells(i,4).Value=SmartTags("pid_man_value")
27 objSheet.Cells(1,5).Value="temp"|
28 objSheet.Cells(i,5).Value=Now
29 'arrêt ajustable de 200 millisecondes
30     StopTime=Timer + 0.2
31     Do
32     Loop Until Timer >= StopTime
33     i=i+1
34 Loop Until i>=1000
35
36
37 'enregistrementt.
38 objExcel.ActiveWorkbook.Save
39 objExcel.ActiveWorkbook.SaveAs strSaveAsPath
40 objExcel.ActiveWorkbook.Close
41 objExcel.Application.Quit
42
43 'écriture sur le fichier
44
45 objExcel.Workbooks.Open strSaveAsPath
46 objExcel.ActiveWorkbook.PrintOut
47 objExcel.ActiveWorkbook.Close
```

## Annexe E Les programmes sous STEP 7

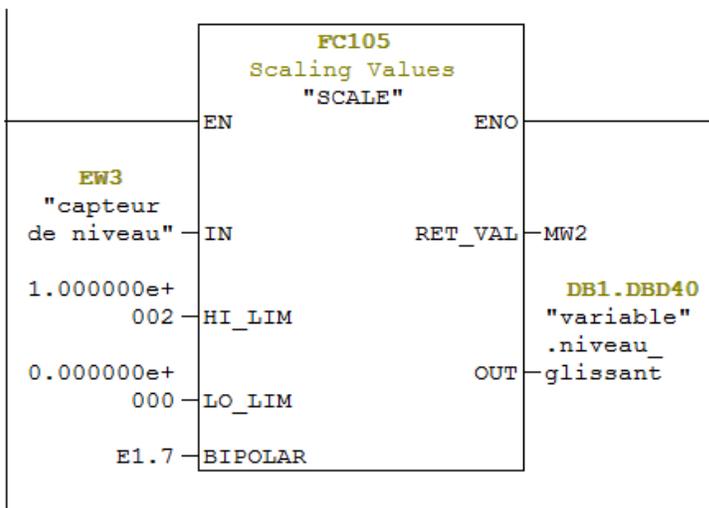
### E.2.2 Extrait du bloc d'organisation principal OB1

OB1 : "Main Program Sweep (Cycle)"

Commentaire :

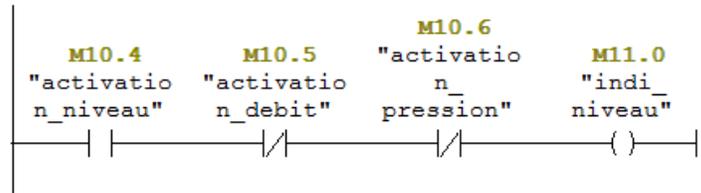
Réseau 1: NIVEAU\_glissant

Commentaire :



Réseau 4: identificateur de niveau

Commentaire :



### E.2.3 Fichier source de la régulation de niveau par mode de glissement

```

2 FUNCTION_BLOCK FB2
3 CONST
4     //Coefficients
5     c1:=0.01186;
6     c2:=0.006363;
7
8 END_CONST
9
10 VAR_INPUT
11     //Entrées
12     r:REAL;//consigne niveau en %
13     x1,K:REAL;//niveau en %
14
15 END_VAR
16
17 VAR_OUTPUT
18     //Sorties
19     u:REAL;//pompe en %
20 END_VAR
21
22 VAR
23     //Variables statique
24     x1_p,u_p,x1f,u_calc,e,s:REAL;
25 END_VAR
26
27 BEGIN
28     //Filtre à moyenne glissante
29     x1:=(x1_p*EXP(-0.05/0.63))+(x1*(1-(EXP(-0.05/0.63))));
30     //Définition de l'erreur
31     e:=x1-r;
32     //Surface de glissement
33     s:=e;
34     //La commande
35     u_calc:=(1/c1)*(-(K*ATAN(s)) + ((c2*x1)))+20;
36     //saturation de la commande
37     IF u_calc < 0 THEN
38         u:=0;
39     ELSIF u_calc > 100 THEN
40         u:=100;
41     ELSE
42         u:=u_calc;
43     ;
44     END_IF;
45
46
47     x1_p:=x1;
48     u_p:=u;
49 END_FUNCTION_BLOCK

```