

République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Abderrahmane MIRA de BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa



## Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en ELECTROMECHANIQUE  
*Option* : ELECTROMECHANIQUE

### *Thème*

*Etude et programmation d'un régulateur PID  
pour remplisseuse d'eau minérale au sein de  
l'entreprise IFRI*

Présenté par :

**M<sup>r</sup>: MEDJKOUNE ABDELKADER**

Encadré par :

**M<sup>r</sup>: OUATAH El Hanafi  
M<sup>r</sup>: TAZERART Farid  
M<sup>r</sup> : TOUAHRI Djamel**

Examiné par :

**M<sup>r</sup>: Z.Boudries  
M<sup>r</sup>: S.Tamaloust**

2017/2018

## *REMERCIEMENTS*

*Un grand merci pour le bon Dieu, le tout puissant de m'a avoir accordé santé, force et courage afin d'arrivé au terme de ce modeste travail.*

*Je tien à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur « Mr : E. OUATAH » et mon Co-promoteur « Mr : F.TAZERART » pour leur aide et suivi pour l'élaboration de ce mémoire.*

*Mes profonds remerciement à l'ingénieur d'automatisme industriel « Mr : D.TOUAHRI », au sein de la SARL IFRI, de m'avoir proposé ce sujet et consacré un temps pour moi et qui m'a permis d'effectuer mon stage dans des meilleures conditions.*

*Je remercie vivement les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*En fin, je remercie vivement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire en particulier  
M<sup>l</sup> « H.MALOUM »*

## *DÉDICACES*

*Au nom du tout puissant  
Je dédie ce travail*

*A la mémoire de ma très chère grande mère maternelle  
KELTTOUMA que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

*A mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours  
soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont  
Toujours porté pour mes études, je ne les remercierai jamais  
assez, pour tout ce qu'ils m'ont fait et à qui je souhaite une  
longue vie.*

*A mon très cher oncle LYES pour ses prestigieux conseils et à  
l'intérêt qu'il a toujours porté pour mes études.*

*A ma très chère TINA qui m'a soutenue tout au long de mon  
parcours.*

*A mes Chères frères : ANIS et AMINE.*

*A ma chère sœur : ANIES.*

*A mes chères tantes FARIDA et HAMIDA et DIDA.  
A toute ma famille.*

*A tous mes amis*

*En fin à toute personne qui m'est chère au cœur.*

## **Liste des abréviations et symboles**

API : Automate programmable industriel.

PID : proportionnelle intégral dérivée.

WinCC : Windows Contrôle Center.

SARL : société à responsabilité limitée.

PET : polyéthylène téréphtalate.

SNC : société au non collectif.

CIP : clean in place.

NEP : nettoyage en place.

V : volt.

KVA : kilos volt ampère.

Min : minimum.

max : maximum.

min : minute.

TOR : tout ou rien.

Tr5% : temps de réponse à 5%.

tm : temps de montée.

D1 : dépassement.

Kp : gain statique.

$\square$ (P): erreur statique.

$\frac{1}{T_i}$  : Constante de temps d'intégration.

$T_d$  : Constante de temps de dérivation.

TIA : totally integrated automation.

PLC : Programmable Logico Controller.

Hz : hertz.

AC : alternatif courant.

DC : direct courant.

CPU : Central processing unite.

MPI : Multi Point Interface.

IHM : interface homme machine.

CD : coefficient diélectrique.

c $\square$  : degré.

## *LISTE DES ABREVIATION ET SYMBOLES*

---

CONT : Schéma à contact.

LIST : Liste d'instruction.

LOG : Logigramme.

CAN : convertisseur analogique numérique.

CNA : convertisseur numérique analogique.

DI: digital input.

DO: digital output.

I: adresse d'entrées.

Q : adresse de sorties.

IQ : adresse entrées/sorties.

AI : analogique input.

AO : analogique output.

OB: Bloc Organisation.

FB : Bloc de fonction.

FC : Fonction.

DB : Bloc de données.

SUB : soustraction.

MUL : multiplication.

ADD : adition.

ABS : valeur absolue.

S : set.

R : reset.

**liste des figures**

Figure I.1 : Unité de production de l'eau minérale IFRI.....	6
Figure I.2 : Schéma de conditionnement du produit.....	7
Figure I.3 : Remplisseuse linéaire.....	9
Figure I.4 : Remplisseuse rotative.....	9
Figure I.5 : Carrousel de soutirage.....	10
Figure I.6 : Bec de soutirage.....	10
Figure I.7 : Remplissage a débitmètre.....	11
Figure I.8 : Remplissage pondéral.....	12
Figure I.9 : Remplissage à niveau.....	13
Figure I.10 : Vanne de remplissage avec légère dépression.....	14
Figure II.1 : Vue d'ensemble de la machine.....	15
Figure II.2 : Schéma de l'ensemble de la machine.....	16
Figure II.3 : Processus de remplissage.....	17
Figure II.4 : Entrée des bouteilles à vide.....	17
Figure II.5 : Les gicleurs d'aspiration.....	18
Figure II.6 : Cycle de rinçage	
Figure II.7 : Le principe de remplissage.....	18
Figure II.8 : La capsuleuse.....	19
Figure II.9 : Sortie des bouteilles pleines et capsulées.....	19
Figure II.10 : Vue en coupe du moteur asynchrone.....	21
Figure II.11 : Eléments de transmission de mouvement.....	21
Figure II.12 : Carrousel de soutirage.....	22
Figure II.13 : Le positionnement.....	24
Figure II.14 : Relais de contrôle de niveau.....	25
Figure II.15 : Fonction remplissage.....	25
Figure II.16 : Vanne tout ou rien.....	26
Figure III.1 : Allure de la réponse d'un système stable à un échelon.....	28
Figure III.2 : Allure de la réponse à un échelon d'un système stable après oscillation.....	28
Figure III.3 : réponse à un échelon d'un système non stable (oscillatoire).....	29
Figure III.4 : Système à écart statique non nul.....	29
Figure III.5 : Système à écart statique nul.....	29
Figure III.6 : Système à écart dynamique constant.....	30
Figure III.7 : Système à écart dynamique nul.....	30

Figure III.8 : Temps de réponse à 5% d'un système non oscillant.....	30
Figure III.9 : Temps de réponse à 5% d'un système non oscillant.....	31
Figure III.10 : Réponse insuffisamment amortie .....	32
Figure III.11 : Réponse correctement amortie .....	32
Figure III.12 : Réponse bien amortie sans dépassement.....	32
Figure III.13 : Schémas d'une boucle régulation .....	33
Figure III.14 : Réponse d'un système pour un faible gain.....	35
Figure III.15 : Réponse d'un système pour un fort gain .....	35
Figure III.16: Réponse d'un système pour <b>1 T</b> grand.....	36
Figure III.17: Réponse d'un système pour <b>1 T</b> faible.....	36
Figure III.18 : Structure d'un régulateur PI.....	37
Figure III.19 : L'influence de l'ajout de l'action D pour un régulateur PI .....	38
Figure III.20 : Structure interne d'un Automate Programmable Industriel.....	40
Figure III.21 : Constitution de l'API s7-300 de notre installation .....	40
Figure III.22 : CPU d'un automate S7-300.....	41
Figure III.23 : Approximation d'une courbe analogique par une courbe en escalier .....	42
Figure III.24 : Sonde de niveau capacitive.....	43
Figure III.25 : Sonde capacitive Liquicap FMI51 .....	43
Figure III.26 : Vanne modulante burkert type 8630.....	45
Figure III.27 : Le schéma bloc de la régulation de niveau d'eau de notre système .....	47
Figure III.28 : Ensemble cuve et sonde capacitive.....	48
Figure IV.1 : Création d'un projet .....	51
Figure IV.2 : Insertion de la CPU .....	52
Figure IV.3 : Ajout du module de communication .....	53
Figure IV.4 : Insertion de l'alimentation« PS ».....	53
Figure IV.5 : Insertion des modules TOR.....	54
Figure IV.6 : Propriétés adresses.....	55
Figure IV.7 : Insertion des modules sortie/ entrée analogique.....	55
Figure IV.8 : La configuration de type de sorties analogique.....	56
Figure IV.9 : Ajout de l'IHM.....	57
Figure IV.10 : Connexion de l'IHM avec la CPU.....	58
Figure IV.11 : Choix des blocs de programmation .....	59
Figure IV.12 : Vue racine.....	67
Figure IV.13 : Visualisation du comportement de notre système .....	68

*Listes des figures*

---

Figure IV.14 : Paramètres de la sonde .....	68
Figure IV.15 : Paramètres de la vanne modulante .....	68
Figure IV.16 : Comportement de notre système au régime permanent .....	70
Figure IV.17 : Comportement de notre système avec le régulateur doux.....	70
Figure IV.18 : Comportement du système avec le régulateur agressif .....	71
Figure IV.19 : Influence de la diminution du gain sur le système .....	71
Figure IV.20 : Influence de la diminution du gain sur le comportement du système .....	72
Figure IV.21 : Influence du gain sur la boucle de régulation.....	73
Figure IV.22 : Influence de l'augmentation du gain sur le procédé.....	73
Figure IV.23 : Influence de l'augmentation de l'action intégrale sur le procédé.....	74
Figure IV.24 : Influence de l'augmentation de l'action intégrale sur le système .....	75
Figure IV.25 : Influence de la diminution de l'action intégrale sur le système .....	75
Figure IV.26 : Influence de la diminution de l'intégral sur notre système .....	76
Figure IV.27 : Comportement du système avec des faibles paramètres du régulateur .....	76
Figure IV.28 : Effet du basculement du régulateur agressif vers le régulateur doux.....	77

**Liste des tableaux**

Tableau II.1 : Puissances et consommation .....	22
Tableau III.1 : Synthèse sur les actions PID .....	37
Tableau III.2 Caractéristiques de liquicap.....	43
Tableau IV.1 : Les adresses des modules TOR.....	54
Tableau IV.2 : Les adresses de sorties analogique.....	56

## **Sommaire**

### *Introduction générale*

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### *Présentation de l'entreprise IFRI*

Présentation de l'entreprise IFRI.....	3
historique.....	3
Sa forme juridique.....	3
Le capital social.....	3
Situation géographique.....	4
Produits.....	4
Organigramme général de S.A.R.L. <IFRI> : .....	4

### *Chapitre I : Généralité sur les remplisseuses*

I.1. Introduction.....	6
I.2. Conditionnement de l'eau minérale.....	6
I.2.1. Unité de conditionnement de l'eau minérale « IFRI ».....	6
I.2.2. Procédé de conditionnement de l'eau minérale « IFRI ».....	6
I.2.3. Rôle de l'ensemble des éléments d'une ligne de production « IFRI ».....	8
I.3. Les remplisseuses.....	8
I.3.1. Remplisseuses linéaires.....	8
I.3.2. Remplisseuses rotatives.....	9
I.3.3. Critères de choix d'une remplisseuse.....	9
I.4. Technologies de remplissage rotatif.....	10
I.4.1. Les soutireuses.....	10
I.5. Techniques de remplissage.....	11
I.5.1. Remplissage à débit mètre.....	11
I.5.2. Remplissage pondérale.....	12
I.5.3. Remplissage à niveau.....	13
I.6. Différentes techniques de remplissage à niveau.....	13
I.7. Conclusion.....	14

### *Chapitre II : description de l'ancien système de remplissage et élaboration d'un cahier de charge*

II.1. Introduction.....	15
II.2. Description du fonctionnement de l'ancien système de remplissage.....	15

II.2.1. Eléments constituant la remplisseuse.....	16
II.2.2. Le processus de remplissage.....	17
II.3. Les caractéristiques de la remplisseuse .....	19
II.3.1. Vitesse programmables.....	19
II.3.2. Mode de fonctionnement .....	20
II.3.3. Type d'actionnement et de gestion mécanique.....	20
II.3.4. Puissances et consommations .....	21
II.4. Description du système de remplissage de bouteilles .....	22
II.4.1. Description du carrousel de soutirage.....	22
II.4.2. Les différentes phases de remplissage.....	23
II.4.3. Le contrôle de niveau du réservoir principal (A).....	24
a- Le relais de contrôle de niveau.....	24
b- Contrôle de niveau, fonction de remplissage.....	25
c- Diagramme fonctionnel.....	25
d- Fonction remplissage.....	25
e- Vannes Tout ou Rien .....	25
II.5. Problématique.....	26
II.6. Cahier de charge .....	27
II.7. Conclusion .....	27
<b><i>Chapitre III : Etudes théorique et mise au point d'une boucle de régulation de niveau</i></b>	
III.1. Introduction .....	28
III.2. Critères de performance d'une régulation.....	28
III.2.1. Stabilité.....	28
III.2.2. Précision .....	29
III.2.3. Rapidité.....	30
III.2.4. Amortissement.....	31
III.3. Eléments constituant d'une boucle de régulation.....	33
III.3.1. La sortie X .....	33
III.3.2. Le retour R.....	33
III.3.3. La consigne.....	33
III.3.4. La perturbation .....	34
III.3.5. Le comparateur .....	34
III.3.6. Le régulateur.....	34

III.3.7. L'actionneur.....	34
III.3.8. Le procédé .....	34
III.4. Les correcteurs de base de la régulation PID .....	34
III.4.1. Analyse des correcteurs de base <i>P</i> , <i>I</i> et <i>D</i> .....	35
a. Analyse de l'action <i>P</i> : .....	35
b. Analyse de l'action <i>I</i> : .....	36
c. Analyse de l'action <i>D</i> .....	37
III.4.2. Synthèse sur les actions <i>PID</i> .....	37
III.4.3. Régulateur de type <i>PI</i> .....	37
III.4.4. Régulateur de type <i>PID</i> .....	38
III.5. Méthodes de réglages des paramètres du régulateur <i>PID</i> .....	38
III.6. Mise au point d'une boucle de régulation de niveau.....	39
III.6.1. Moyen matériel à utiliser .....	39
III.6.2. Moyen logiciel à utiliser .....	39
III.7. Identification et caractéristiques des moyens matériels utilisés.....	39
III.7.1. Élément de commande et de gestion de la régulation .....	39
a. Présentation de l'automate siemens s7-300 .....	40
b. Présentation de la CPU S7-300.....	40
III.7.2. Éléments de traitement des signaux analogiques .....	42
a. Module d'entrées analogiques.....	42
b. Module de sorties analogique .....	42
c. Approximation d'une valeur analogique .....	42
III.7.3. Élément de mesure du niveau .....	43
a. Présentation de la sonde capacitive Liquicap FMI51 (endress hauser) .....	43
b. Motivations du choix de la sonde capacitive Liquicap FMI51 .....	43
III.7.4. Actionneur .....	44
d. Raisons du choix de la vanne modulante burkert type 8630.....	45
III.8. Présentation des moyens logiciels utilisés .....	45
III.8.1. Logiciel utilisé pour la gestion de la régulation (STEP 7) .....	46
III.8.2. Logiciel utilisé pour la supervision de la régulation (WINCC).....	46
III.9. Principe de fonctionnement de la régulation du niveau d'eau dans la cuve.....	47
III.9.1. Configuration de la sonde capacitive.....	48
III.9.2. Mise à l'échelle de l'entrée analogique .....	49

III.10. Conclusion..... 50

***Chapitre IV : Programmation et supervision***

IV.1. Introduction..... 51

IV.2. Programmation de l'API ..... 51

IV.3. La Création du projet ..... 51

IV.4. 1.La configuration matérielle ..... 52

    IV.4.1. Insertion de la CPU ..... 52

    IV.4.2. Insertion de l'alimentation ..... 53

    IV.4.3. Insertion des modules entrées/sortie TOR..... 53

    IV.4.4. Identification des adresses des modules entrées/sortie TOR..... 54

    IV.4.5. Insertion des modules sortie/ entrée analogique..... 55

    IV.4.6. Configuration de type de sorties/entrées analogique..... 55

    IV.4.7.Ajout de l'IHM ..... 57

IV.5. Programmation des blocs de notre système ..... 58

    IV.5.2. Création de la fonction de mise à l'échelle d'entrée ..... 59

    IV.5.3. Création de la fonction de mise à l'échelle de sortie..... 60

    IV.5.4. Création du régulateur PI doux et agressif ..... 61

    IV.5.5. La gestion des régulateurs doux et agressif..... 64

IV.6. Supervision..... 67

    IV.6.1. Vues de l'IHM concernant la régulation ..... 67

IV.7. Interprétation du comportement de notre système (courbes)..... 69

    IV.7.1. Diagramme fonctionnel pour la lecture des courbes ..... 69

    IV.7.2. présentation des résultats obtenus ..... 70

VI.8. Conclusion ..... 78

Conclusion générale ..... 79

Bibliographie

Annexes

*Introduction*  
*générale*

## **Introduction générale**

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'université A. Mira de BEJAIA et l'entreprise IFRI.

Dans le monde industriel, les exigences attendues de l'automatisation et de la régulation ont bien évolué avec le développement technologique. Les objectifs des entreprises ne s'arrêtent pas uniquement à l'augmentation de la productivité, ou à la diminution des coûts de production, c'est bien plus que ça car elles s'assurent également de l'amélioration des conditions de travail, de sécurité et à la suppression des tâches pénibles, fatigantes et répétitives.

L'automate programmable industriel (API) apparaît donc comme la solution parfaite aux besoins d'automatisme et de régulation vue sa qualité d'adaptation et de flexibilité. Il est devenu aujourd'hui le constituant le plus répondu dans l'industrie qui utilise des systèmes d'asservissement ou de régulation, que ce soit pour gérer le débit d'un fluide dans une conduite, la température d'un produit, le niveau d'un liquide dans une cuve...etc.

Historiquement, les régulateurs n'étaient pas intégrés dans l'unité centrale des API, mais se présentaient sous forme de modules autonomes gérant leur environnement propre (acquisition, calcul, commande...).

Le développement extraordinaire des API a provoqué des changements importants dans la conception des systèmes de commande /régulation. Leurs puissances de calcul et leurs fiabilités les rendent aptes à prendre également en charge les aspects commande/régulation avec des performances nettement supérieures à celle du régulateur analogique. Pratiquement tous les systèmes de commande / régulation sont construit actuellement à partir des API.

Pour tirer réellement profit des capacités des API, il ne suffit pas de produire le comportement des régulateurs PID analogiques, il faut mettre en œuvre des techniques d'automatique spécifiques pour la commande par ordinateur. Par ailleurs, le développement des logiciels d'automatique et de leurs utilisations a permis d'améliorer d'une façon significative l'efficacité de la conception et de la mise en œuvre des systèmes de commande/régulation qui fait partie intégrante de la qualité de production, c'est donc un point non négligeable de la chaîne de valeurs d'une installation.

Le présent travail qui m'a été proposé au sien de l'entreprise « IFRI » consiste à l'étude et la programmation d'un régulateur PID pour une remplisseuse de l'eau minérale afin de réaliser une boucle de régulation de niveau.

Pour une meilleure présentation de notre travail, le mémoire a été organisé en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre sera consacré à la description générale des remplisseuses et aux différents types de remplissage.
- ✓ Le deuxième chapitre sera dédié à la description détaillée de la remplisseuse sur laquelle se porte notre travail tout en expliquant son principe de remplissage et de control du niveau pour mettre en évidence la problématique et élaborer un cahier de charges.
- ✓ Le troisième chapitre, contient une étude théorique de la régulation et la mise au point de la boucle de régulation du niveau de notre système.
- ✓ Le quatrième chapitre est réservé à la création et la programmation du régulateur PID et de la boucle de régulation avec STEP7 et une supervision de la régulation avec WinCC flexible. Les résultats obtenus par simulation en temps réel sur site et leur interprétation complètent ce chapitre.

## **Présentation de l'entreprise**

### **➤ historique :**

La **SARL** Ibrahim et fils « **IFRI** » est une société à caractère industriel évaluant dans le domaine de l'agro-alimentaire. Elle se situe à Ighzer-Amokrane, Daïra d'IFRI Ouzellaguen, dans la wilaya de Bejaia. Elle est implantée à l'entrée de la vallée de la Soummam, au contrebas du massif montagneux du Djurjura qui constitue son réservoir naturel d'eau.

A l'origine, il y avait la limonadière Ibrahim et fils, fondée en 1986 ayant pour activité la production de limonades diverses et de sirops. Et ce n'est que dix ans plus tard le 20/07/1996 que la société inaugure son premier atelier d'embouteillage d'eau minérale en PET (polyéthylène téréphtalate).

A cette date, plus de 20 million de bouteilles sont commercialisées sur l'ensemble du territoire national. Ce chiffre atteint 250 million en 2004 avant de franchir le cap des 500 million de litres (emballage PET et verre) en 2005. le Groupe Ibrahim et fils est doté de son propre laboratoire d'analyses. À l'aide d'un matériel ultramoderne et performant, sa propre équipe de microbiologistes s'assure au quotidien de la parfaite conformité physico-chimique, bactériologique et organoleptique de ses produits, depuis l'entrée (contrôle des matières premières et des emballages) jusqu'à la sortie (produit fini) et pendant toutes les phases de production et de stockage [1].

### **➤ Sa forme juridique :**

Créée en 1986, avec un statut juridique SNC (Société au Nom Collectif), et ce n'est qu'en 1996 qu'elle hérite le statut Sarl (Société A Responsabilité Limitée), composée de six associés.

### **➤ Le capital social :**

Le capital social était 3.000.000 DA en 1996, ce dernier a subi une extension en 2005 ou il a atteint 1.293.000.000 DA.

Siege social : Zone industrielle « **AHRIK** » Ighzer Amokrane –IFRI Ouzellaguen, (06231) Bejaia-Algérie.

Tel: 034 35 12 66/ 10 17/1019.

Fax: 034 35 1232.

Web: [www.ifri-dz.com](http://www.ifri-dz.com)

Email: [ifri@ifri-dz.com](mailto:ifri@ifri-dz.com).

➤ **Situation géographique :**

Le complexe de production d'eau minérale naturelle de la SARL IBRAHIM et FILS est situé dans la commune d'Ighzer- Amokrane- Daïra d'IFRI Ouzellague-Wilaya de Bejaia. Il est localisé au sud-ouest de l'agglomération d'Ighzer Amokrane, Soit à 400 m au sud de la RN26.

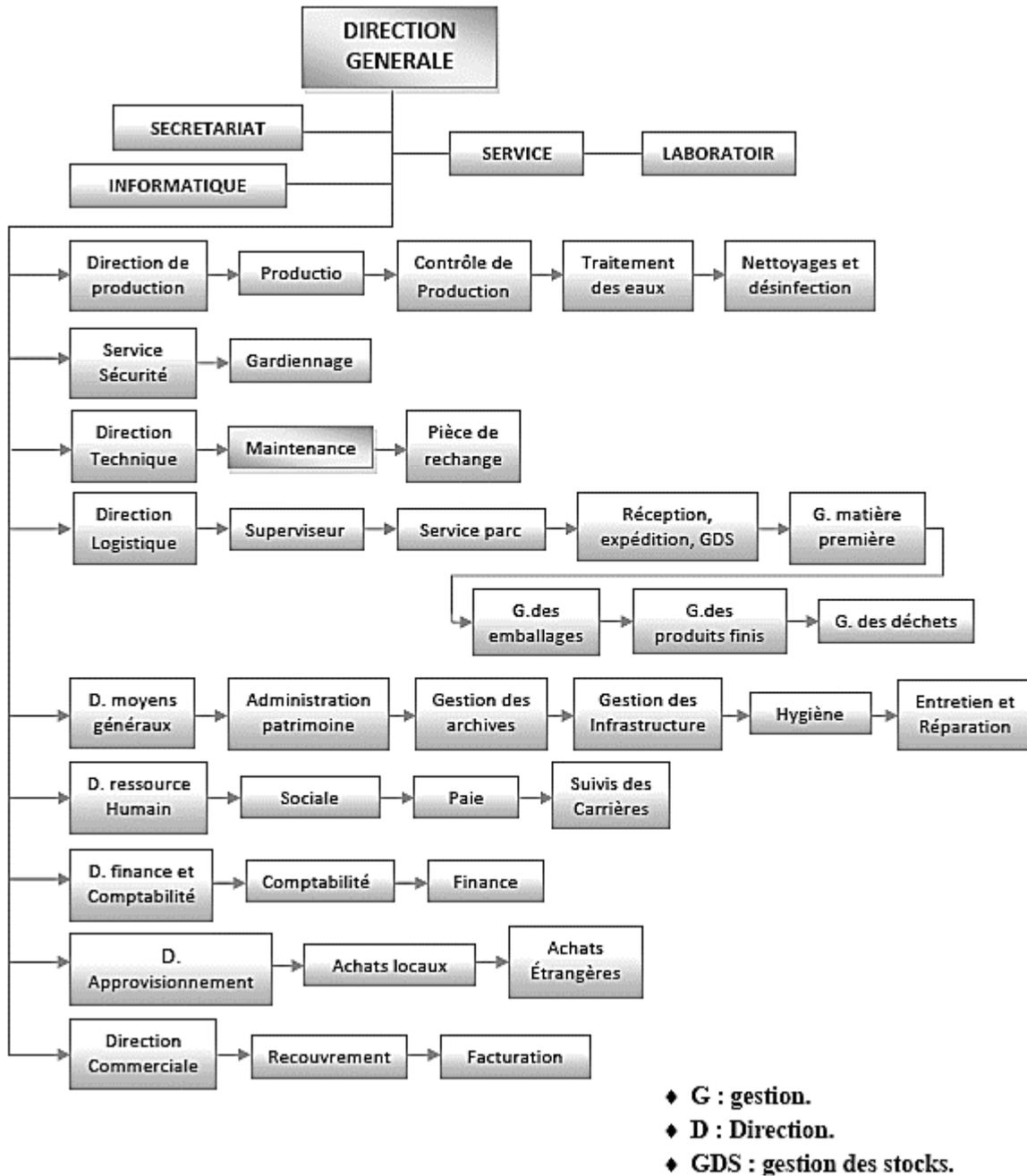
➤ **Produits :**

La gamme de produits est riche d'une cinquantaine d'articles qui vont de l'eau minérale plate, gazéifiée et aromatisée aux sodas aux goûts différents en passant par les eaux fruitées et les cocktails. Dans toutes ses unités et à toutes les étapes de la production, l'entreprise affirme veiller au respect des normes d'hygiène, de sécurité et d'environnement. Après avoir couvert les besoins du marché national, Les produits de la marque IFRI sont:

- Eaux minérales naturelles sous la marque IFRI
- Eaux minérales gazéifiées sous la marque IFRI
- Eaux minérales fruitées sous la marque IFRI
- Eaux fruités aux laits sous la marque IFRI
- Boissons sodas sous la marque IFRI
- Boisson isotonique pour le sport sous la marque AZRO
- Huile d'olive sous la marque NUMIDIA [1].

➤ **Organigramme général de S.A.R.L. <IFRI> :**

La structure organisationnelle de la SARL Ibrahim et fils repose sur un modèle hiérarchique classique. L'organigramme suivant schématise les différentes directions et services de l'entreprise.



Organigramme général de S.A.R.L. <IFRI>

# *CHAPITRE I*

## I.1. Introduction

Une remplisseuse de liquides assure un dosage stable et continu des liquides dans les différents contenants (flacons, bouteilles...) afin de faciliter leur conditionnement, à cette effet il existe différentes types de remplisseuse et différentes techniques de remplissage que nous allons présenter à la suite de ce chapitre.

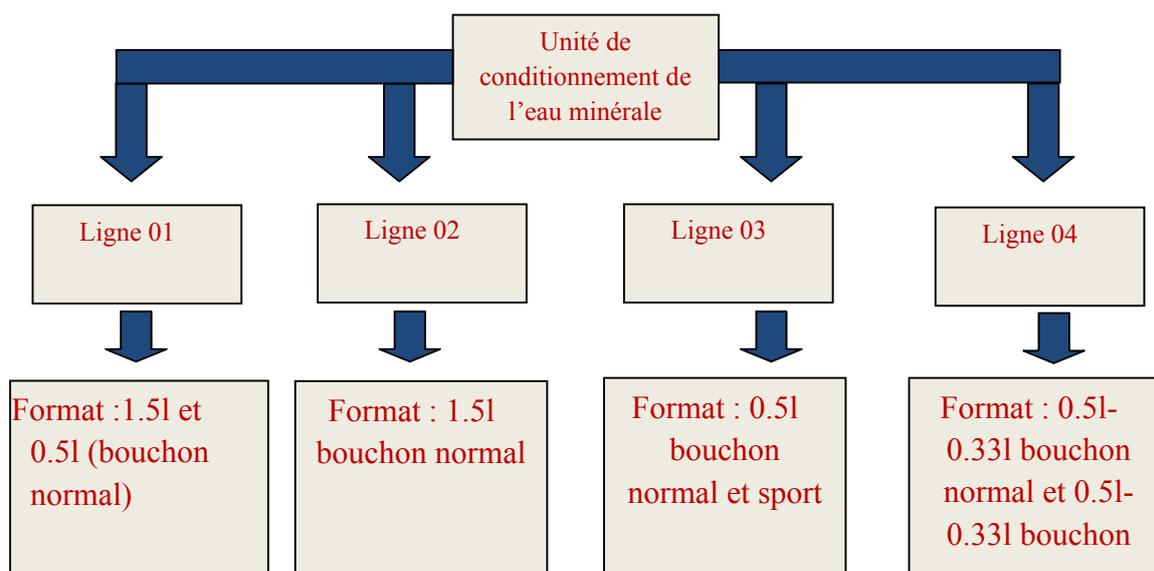
Avant de passer à cette étape nous allons donner un aperçu général sur le conditionnement de l'eau minérale dans l'entreprise **IFRI**.

## I.2. conditionnement de l'eau minérale « IFRI »

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes lignes de conditionnement de l'eau minérale et son procédé.

### I.2.1. Unité de conditionnement de l'eau minérale « IFRI »

L'unité de conditionnement de l'eau minérale est composée de 4 lignes qui sont présentées dans la figure suivante :



**Figure I.1 :** Unité de conditionnement de l'eau minérale IFRI

### I.2.2. Procédé de conditionnement de l'eau minérale « IFRI »

Une ligne de conditionnement est constituée d'un ensemble de machines figure (I.2), sur les quelles l'eau brute et la préforme sous forme P.E.T doivent passer pour avoir un produit fini qui répond aux normes de consommation.

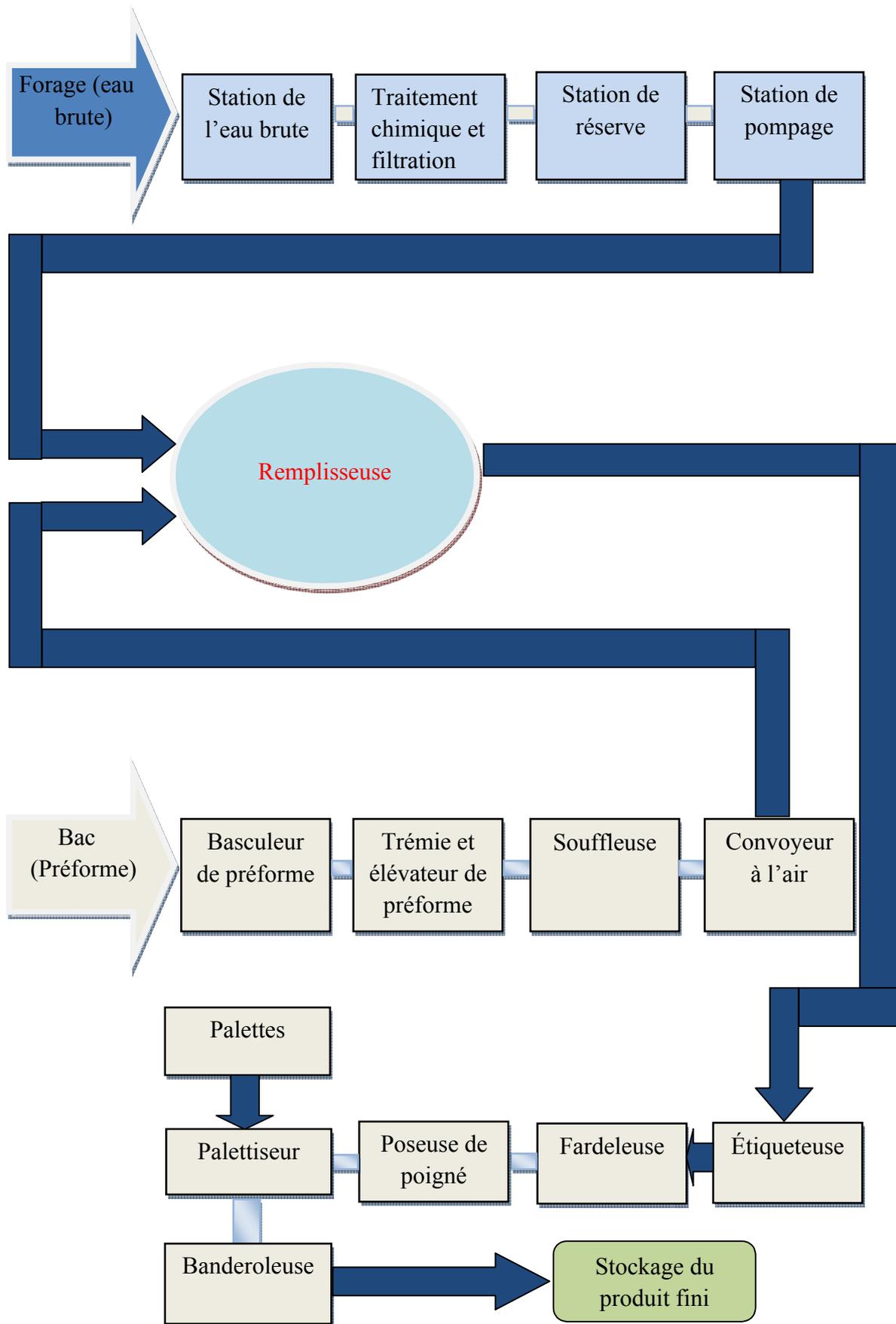


Figure I.2 : Schéma de conditionnement du produit

### I.2.3. Rôle de l'ensemble des éléments d'une ligne de production « IFRI »

- Le forage : il permet l'exploitation de l'eau d'une nappe.
- Station de l'eau brute : elle permet le stockage de l'eau brute dans des réservoirs.
- Station de filtration : elle permet de produire de l'eau consommable à partir d'une eau naturelle.
- Station de réserve : elle permet de faire face aux demandes exceptionnelles en cas d'incendie et de manque d'eau.
- Station de pompage : elle permet la distribution de l'eau filtrée vers les lignes de production.
- L'ensemble Basculeur de préforme et la trémie et l'élévateur de préforme : permet la livraison de la préforme à la souffleuse.
- La souffleuse : elle permet la production de différentes formes de bouteilles.
- Convoyer à l'air : il permet d'envoyer les bouteilles de la sortie de la souffleuse vers l'entrée de la remplisseuse.
- La remplisseuse : elle permet le remplissage et le capsulage des bouteilles.
- L'étiqueteuse : son rôle est de mettre les étiquettes autour de la bouteille.
- La fardeleuse : permet d'envelopper et de mettre les bouteilles en un seul bloc.
- La poseuse de poignés : comme son nom l'indique elle permet le positionnement des poignés sur les fardeaux.
- Palettiseur : il permet de charger les fardeaux sur une palette.
- La banderoleuse : elle permet de déposer de film sur les palettes.

## I.3. Les remplisseuses

**Une remplisseuse** : est un dispositif constitué d'un ensemble de machines qui ont pour objectif le conditionnement et le remplissage de bouteilles.

Les remplisseuses se divisent en deux grandes familles suivantes :

- Les remplisseuses linéaires ;
- Les remplisseuses rotatives.

### I.3.1. Remplisseuses linéaires

Les remplisseuses linéaires sont des machines à un ou plusieurs couloirs pour les cadences faibles et à moyennement élevées. Les remplisseuses linéaires ont plusieurs avantages :

- Utilisent peu de pièces de format ;

- Elles se caractérisent par une structure claire ;
- Une large gamme de volumes et de flacons ;
- Un nettoyage facile [3].



**Figure I.3 :** Remplisseuse linéaire

### **I.3.2. Remplisseuses rotatives**

Pour les cadences élevées, les remplisseuses sont rotatives en continu avec un carrousel dont le nombre de becs peut varier de 4 à plus de 100.



**Figure I.4 :** Remplisseuse rotative

### **I.3.3. Critères de choix d'une remplisseuse [3]**

Le choix de la remplisseuse s'effectue selon les critères principaux suivants:

- La cadence de production à atteindre selon le volume de la bouteille.
- La technologie de remplissage ou le type de bec.
- Le pas de la machine : la distance entre 2 becs de remplissage qui détermine le plus petit et le plus grand diamètre de bouteille possible pour la circulation dans la machine.

## I.4. Technologies de remplissage rotatif

### I.4.1. Les soutireuses

Une soutireuse est une machine qui permet d'effectuer le remplissage de bouteilles ou de canettes par des boissons gazeuses ou non gazeuses, comme l'eau, le jus de fruit...

#### + Différents composants de soutireuse :

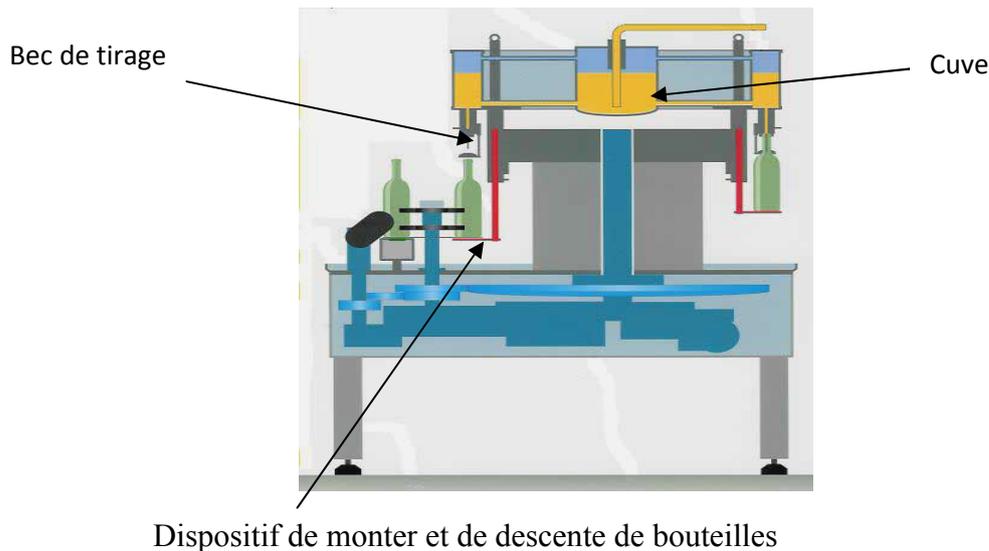


Figure I.5 : Carrousel de soutirage [4]

#### + Différents types de soutireuse :

- Soutireuses volumétriques : La machine mesure le volume de produit qui rentre dans la bouteille.
- soutireuses non volumétrique : niveau constant de liquide dans la bouteille.

#### + Les bécans de soutirage :

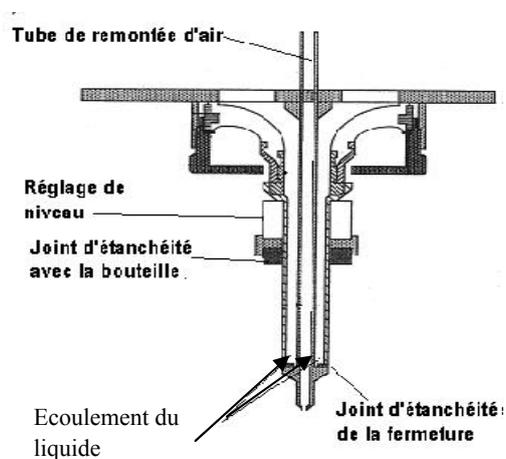


Figure I.6 : Bec de soutirage [4]

**✚ Configuration des becs de soutirage:**

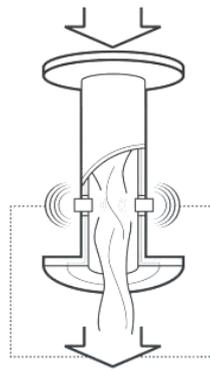
- Tube de remontée d'air ;
- Tube d'écoulement du liquide ;
- Joint d'étanchéité avec la bouteille ;
- Système de fermeture.

**I.5. Techniques de remplissage**

Les techniques de remplissage diffèrent dans la manière de passage du liquide de la cuve à la bouteille.

**I.5.1. Le remplissage à débitmètre**

La machine mesure le volume du produit dans la bouteille. Pour ce faire, un débitmètre (magnétique ou massique) est prévu sur chaque buse de remplissage. La machine qui utilise cette technologie est appelée remplisseuse électronique [5].



**Figure I.7 : Le Remplissage à débitmètre [5]**

**✚ Avantage :**

- La machine est simplifiée mécaniquement car il n'y a pas de montée de bouteilles avec des sellettes et pas de contact avec la bouteille pour éviter des risques de contamination.
- Les becs (ou robinets) sont tous en inox sans joint à fermeture magnétique et sans canule pour éviter la recirculation ou la perte du produit.
- Un système électronique de mesure de la dose permet une traçabilité à la bouteille sur ordinateur.

**✚ Types de débitmètre**

Il existe deux types :

- Volumique pour les liquides conducteurs électriquement ;
- Massique en cas de non conductivité.

Le massique est plus cher que le volumique, dans les 2 cas, la précision est excellente, de l'ordre de 0,5% de la consigne [5].

**✚ Inconvénients :**

- Cette technologie est souvent un peu plus chère à l'achat que le niveau constant ou le volumétrique.
- L'électronique prend place dans la machine et impose un minimum de connaissances à l'équipe de maintenance. Ceci dit, il en est de même avec les autres machines de la ligne, souffleuse et étiqueteuse.

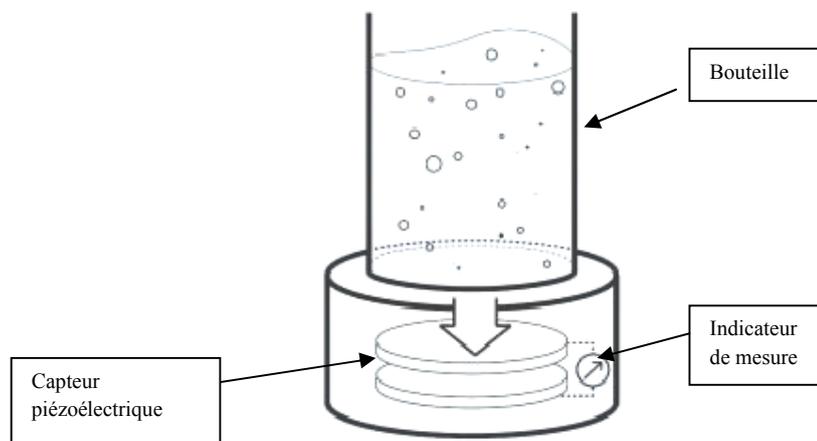
### I.5.2. Remplissage pondéral

La machine mesure le poids du produit qui rentre dans la bouteille, après avoir soustrait le poids net du contenant. Pour se faire, une cellule de pesage a été prévue pour chaque robinet de remplissage.

Le dosage pondéral est intéressant car il permet de faire un tarage de la bouteille vide avant remplissage pour augmenter la précision.

L'électronique associée aux balances permet d'avoir une traçabilité complète pour les dossiers qualité et de suivi de production. Le logiciel développé pour faire la mesure de poids et contrôler l'ouverture et la fermeture du bec, doit prendre en compte :

- Une correction de la force de Coriolis due à la rotation de la machine qui influe la pesée et donc la précision de dosage.
- Une correction statistique de la queue de chute, c'est-à-dire la quantité de produit qui s'écoule entre le bec et le niveau dans la bouteille et qui finalement pèsera dans la bouteille remplie.



**Figure I.8 : Remplissage pondéral [5]**

### I.5.3. Remplissage à niveau

Il s'agit de la technologie la plus classique où la hauteur de niveau est déterminée par celle de la canule qui entre dans la bouteille pendant la phase de remplissage.

Généralement, changer de niveau dans la bouteille signifie changer la canule [5]

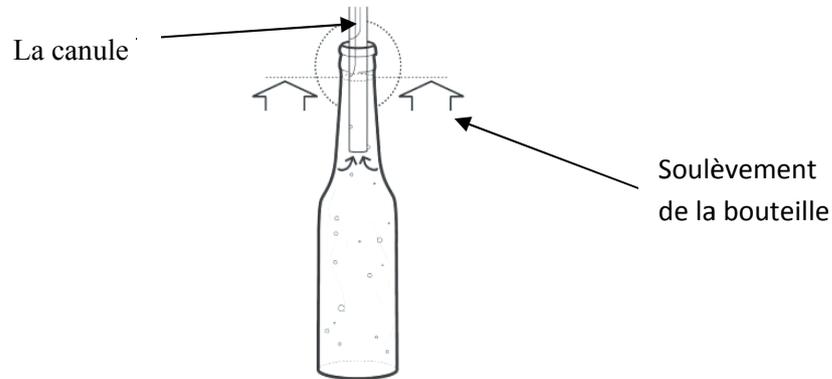


Figure I.9 : Remplissage à niveau

### I.6. Différentes techniques de remplissage à niveau [4]

Le remplissage à niveau utilise le phénomène gravitaire pour remplir la bouteille, il existe différents systèmes :

- **A pression atmosphérique :**

Écoulement sans aucune variation de pression. Le liquide s'écoule dans la bouteille et l'air de la bouteille est évacué par le tube de retour d'air. La profondeur du tube de reflux dans la bouteille détermine le niveau de remplissage.

- **A légère dépression :**

Ce système consiste à appliquer une légère dépression (de l'ordre de 0,5 bar) dans la cuve qui est transmise à la bouteille par l'intermédiaire du "tube retour d'air". Ce système augmente la vitesse de remplissage des bouteilles.

- **A pression différentiel :**

Dans ce cas, une dépression importante (supérieure à 1 bar) est réalisée. Cette dépression est transmise à la bouteille par le tube de retour d'air. Cette dépression crée une aspiration de l'air de la bouteille ce qui provoque un remplissage rapide.

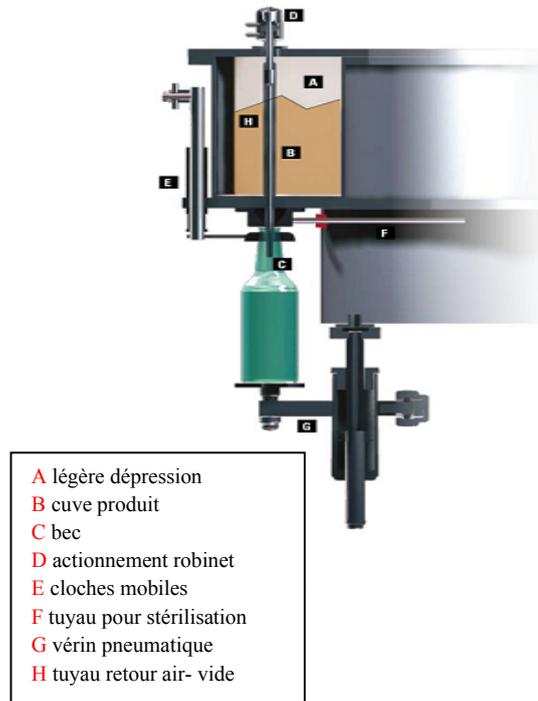


Figure I.10 : Vanne de remplissage avec légère dépression [5]

- **A contre pression :**

Dans ce cas, la cuve de la soutireuse et la bouteille sont mises sous une pression supérieure au gaz dissous dans le liquide.

Le remplissage débute lorsque la pression dans la bouteille est identique à celle de la cuve. Lorsque la bouteille est remplie, le liquide est ramené lentement à la pression atmosphérique [4]

## I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur le conditionnement de l'eau minérale, et nous avons défini les différents types de remplisseuse et les différentes techniques de remplissage de liquide.

# *CHAPITRE II*

## **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter le processus de fonctionnement général de la remplisseuse de bouteille P.E.T (polyéthylène téréphtalate) et de décrire le fonctionnement de la soutireuse sur la quelle porte notre travail et le principe de remplissage de celle-ci.

## **II.2. Description du fonctionnement de l'ancien système de remplissage**

**STILEJET** est une remplisseuse tournante destinée pour le remplissage et la pose des capsules sur des bouteilles en P.E.T, elle est construite par la société **SASIB BEVERAGE** (Italie), achetée par IFRI en 1997. La machine est actuellement responsable du processus de remplissage des bouteilles d'eau (0.33l) de l'entreprise, elle possède des systèmes de rinçage, remplissage et capsulage, voir figure (II.1).

La machine est configurée avec une entrée pour les bouteilles par la gauche suivi d'un carrousel à rotation horaire [6].



**Figure II.1 :** Vue d'ensemble de la machine

### II.2.1. Eléments constituant la remplisseuse

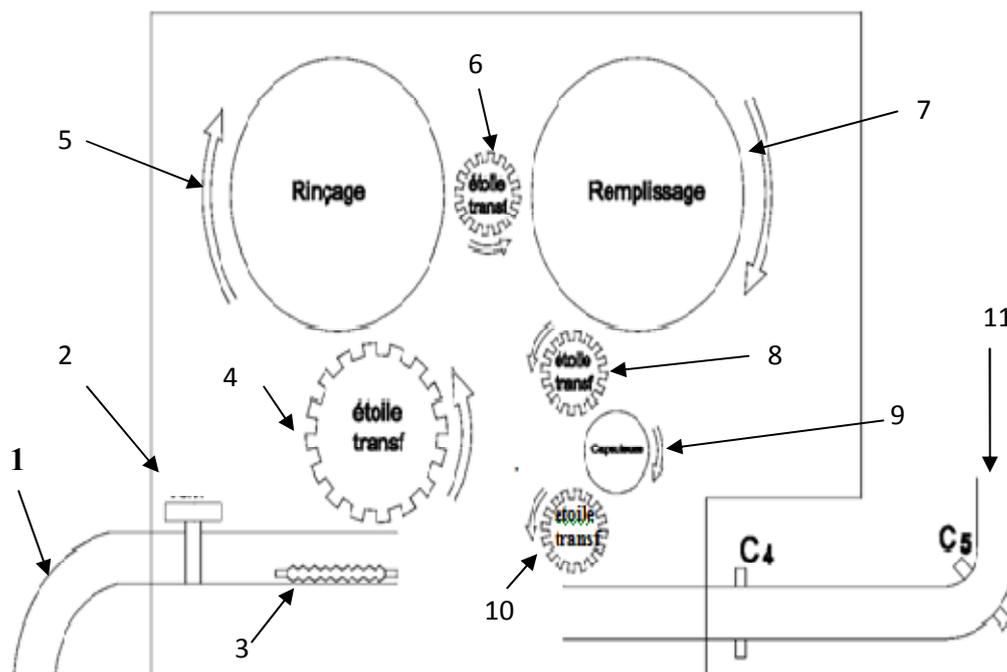


Figure II.2 : Schéma de l'ensemble de la machine

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| (1) Entre bouteilles vides | (7) Soutireuse                                 |
| (2) vérin de passage       | (8) troisième étoile                           |
| (3) Vis sans fin           | (9) Machine à capsuler                         |
| (4) première étoile        | (10) quatrième étoile                          |
| (5) Unité de rinçage       | (11) sortie des bouteilles pleines et capsuler |
| (6) deuxième étoile        |  |

Le transfert de la bouteille de la souffleuse à la remplisseuse est assuré par un convoyeur aérien d'entrée munis d'une vis sans fin (3) afin d'assurer un pas de déplacement. Cette même bouteille va être transférée à l'unité de rinçage (5) par l'étoile de transfert (4).

Après rinçage, la bouteille va être transférée à la soutireuse (7) par l'étoile de transfert (6), pour entamer la phase de remplissage. Le liquide à embouteiller se trouve dans un petit réservoir qui appartient à l'ensemble du carrousel de soutirage, d'où il est envoyé aux vannes de remplissage par gravité. Après remplissage, la bouteille va être transférée à l'unité de capsulage (9) par une étoile de transfert (8).

La bouteille fermée va être transférée vers un convoyeur de sortie (11) par une étoile de transfert (10). Ensuite ces bouteilles vont passer vers une autre étape qui s'appelle l'étiquetage [6].

### II.2.2. Le processus de remplissage

Le processus de remplissage des bouteilles comprend cinq phases :

- (1) Entrées des bouteilles vides ;
- (2) Rinçage ;
- (3) Remplissage ;
- (4) Capsulage ;
- (5) Sortie des bouteilles pleines étiquetées ;

La figure suivante illustre les cinq phases de remplissage :

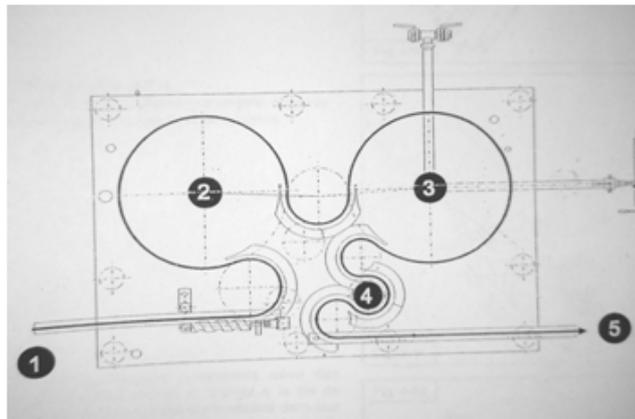


Figure II.3 : Processus de remplissage [6]

#### 1- Entrée des bouteilles à vide :

Les bouteilles vides arrivent dans l'unité de rinçage, entrant en contact avec une vis sans fin qui les espacement et élimine la poussée. L'espacement correspondant exactement à l'entraxe des pinces de l'unité de rinçage et des robinets de remplissage de la soudeuse. Les bouteilles sont ensuite centrées sous les pinces de prise à l'aide d'une étoile qui les guide.

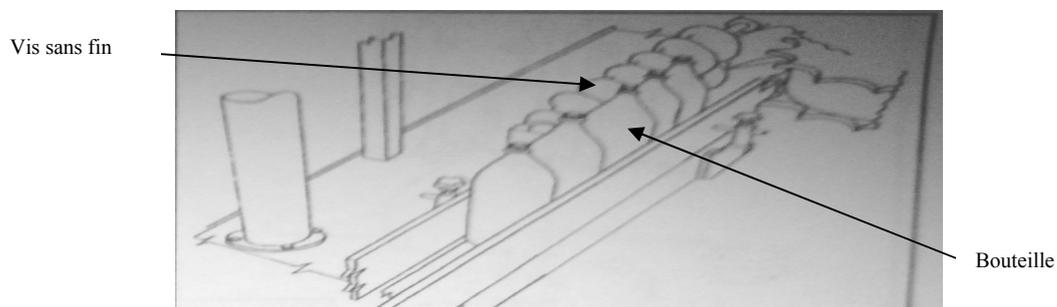


Figure II.4 : Entrée des bouteilles à vide

#### 2- Le rinçage :

Un bras de levier coulissant sur un twist renverse les bouteilles sur les gicleurs d'aspiration.

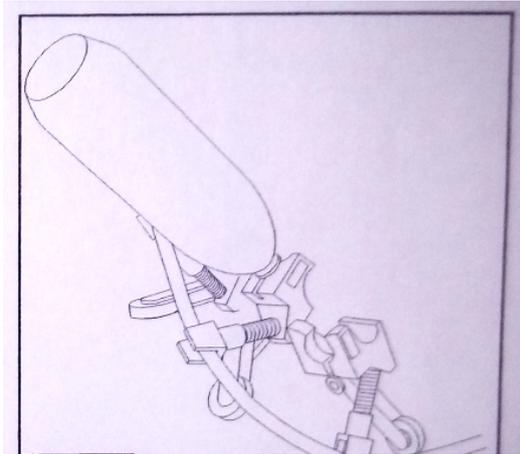


Figure II.5 : Les gicleurs d'aspiration

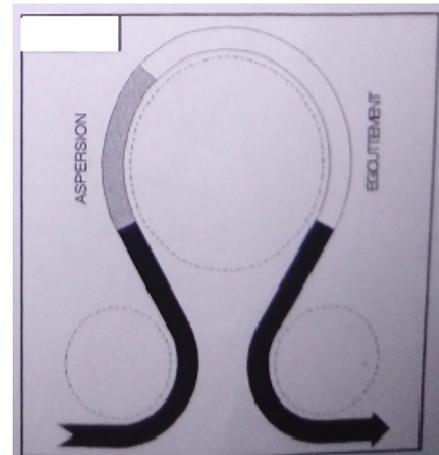


Figure II.6 : Cycle de rinçage

Le cycle de rinçage commence avec des séquences d'aspiration et d'arrêt. A la fin de l'opération, le twist replace les bouteilles dans leur position d'origine afin qu'elles sortent de l'unité de rinçage et entrent dans la soutireuse pour le cycle de remplissage [6].

### 3- Le remplissage :

Sur cette machine le processus de remplissage est à niveau constant, comme présenté par la figure ci-dessus. Les bouteilles provenant de l'unité de rinçage sont entraînées par les secteurs de l'étoile d'entrée de la soutireuse qui les fait glisser sur des rampes et les achemines pour qu'elles soient saisies par les pinces des robinets de remplissage sous la collerette du col de bouteille.

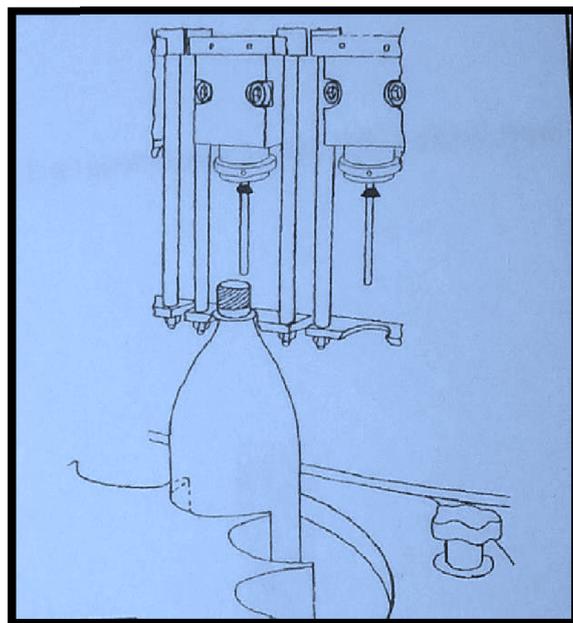


Figure II.7 : Le principe de remplissage [6]

#### 4- Le capsulage :

A l'intérieur de l'unité de capsulage, les têtes de capsulage tournent autour de roue dentée placée à l'intérieur de l'embase transmet le mouvement de rotation des têtes autour de l'axe de l'unité de capsulage. Les capsules provenant d'une trémie centrifuge placée dans la partie supérieure de l'unité de capsulage descendant le long d'un canal profilé et vont se positionner à la fin de celui-ci, comme le représente la figure ci-dessous ; elles seront au passage de la bouteille.

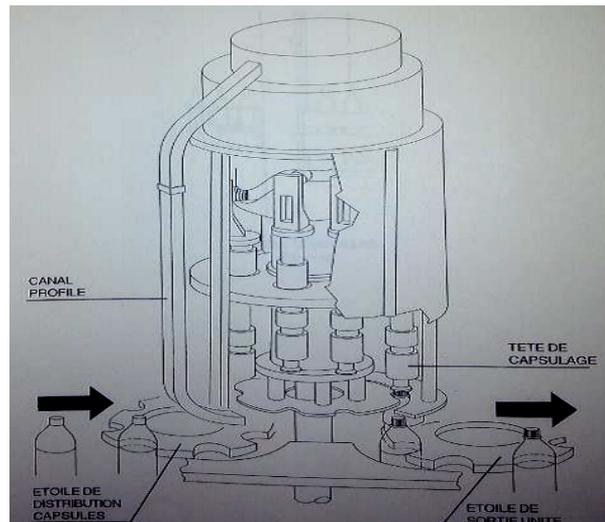


Figure II.8 : La capsuleuse [6]

#### 5- Sortie des bouteilles pleines et capsulées :

Les bouteilles capsulées passent sur le convoyeur qui les achemine vers la phase de travail suivante des machines situées en aval comme le montre la figure suivante :

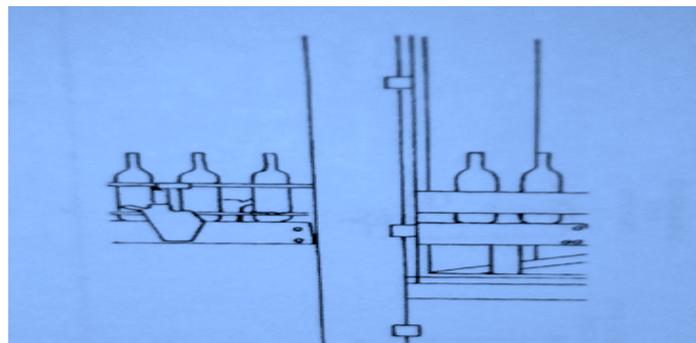


Figure II.9 : Sortie des bouteilles pleines et capsulées

### II.3. Les caractéristiques de la remplisseuse [6]

#### II.3.1. Vitesse programmables

Les vitesses programmables sont :

- Modalité de production
- Modalité pas à pas
- Modalité d'hygiénisation (CIP).

### **II.3.2. Mode de fonctionnement**

On distingue trois types de fonctionnement :

#### **1- Mode automatique :**

Le mode automatique sert à remplacer un système à logique câblé par un appareil électronique programmable, adapté à l'environnement industriel, qui réalise des fonctions d'automatisme pour assurer la commande de pré-actionneur et d'actionneur à partir d'information logique, analogique ou numérique, et la surveillance des processus industriels.

#### **2- Mode manuel :**

Il permet une plus grande liberté dans la manipulation des fonctions de la machine.

#### **3- Mode NEP :**

C'est Un Nettoyage En Place (NEP) ou Clean-In-Place (CIP) en anglais est un système automatique de nettoyage des installations sans démontage. Il est intégré à la machine lors de la conception, la cuve et tuyaux sont lavés à l'aide d'un circuit d'eau parallèle.

### **II.3.3. Type d'actionnement et de gestion mécanique**

La machine est actionnée par un moteur asynchrone voire figure (II.11). Commandé par un variateur qui permet de contrôler la vitesse de production.

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes [7].

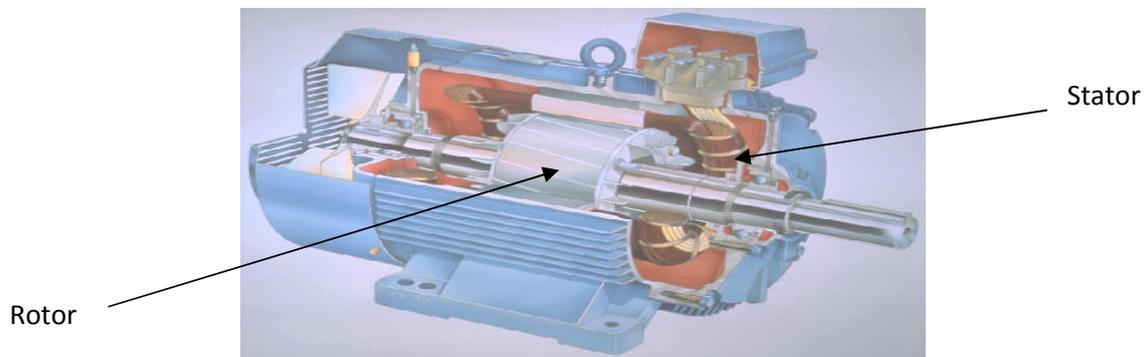
C'est un moteur qui se caractérise par le fait qu'il est constitué d'un stator (inducteur) alimenté en courant alternatif et d'un rotor (induit) soit en court-circuit, soit bobiné aboutissant à des bagues dans les quelles le courant est créé par induction. Ces moteurs ont la particularité de fonctionner grâce à un champ tournant.

On distingue 2 catégories de moteur asynchrones en fonction du type de rotor :

- rotor en court-circuit (cage d'écureuil), dans les quelles l'enroulement du rotor est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs et d'aluminium pour les petits. Les

barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux fabriqués en cuivre ou en aluminium.

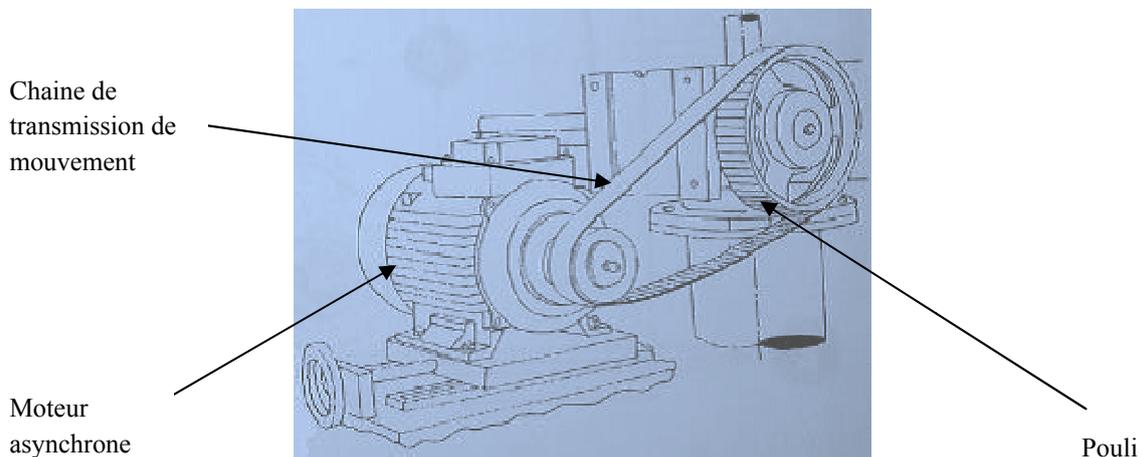
- à rotor bobiné à bagues, dans les quelles l'enroulement du rotor aboutit à des bagues par l'intermédiaire desquelles on peut insérer des résistances. Ils sont de grande puissance [8].



**Figure II.10 :** Vue en coupe d'un moteur asynchrone [8]

Le moteur asynchrone transmet le mouvement aux éléments suivants :

- Etoile de transport de bouteilles et vis son fin ;
- Carrousel de rinçage ;
- Unité de capsulage ;
- Tapis de transport de bouteilles vide à la machine.



**Figure II.11 :** Éléments de transmission de mouvement [6].

#### II.3.4. Puissances et consommations

Les puissances et consommations sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.1 : Puissances et consommation [6]

Tension principales	380V/ 50Hz
Tension auxiliaire	24V
Puissance électrique totale installée	11 kVa
Volume de réservoir central (rempli)	80l
Pression air comprimé	Min6/max12 bar
Pression eau de lavage	12 bar
Pression air stérile	0.5 bar

## I.4. Description du système de remplissage de bouteilles

### II.4.1. Description du carrousel de soutirage

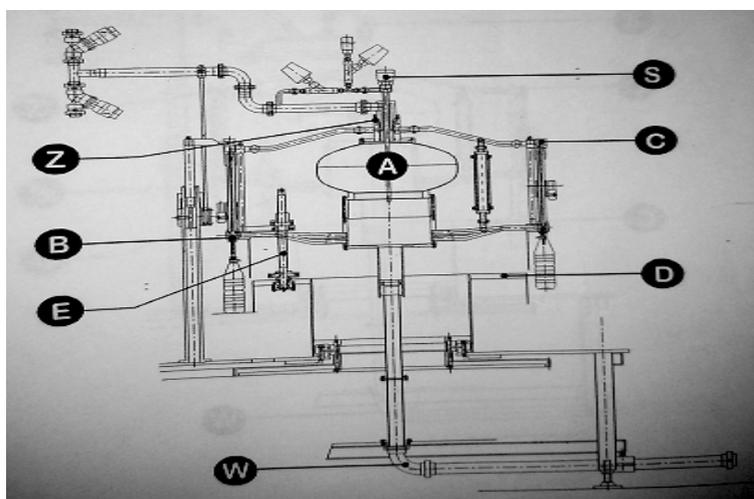


Figure II.13 : Carrousel de soutirage [6]

Il comprend un réservoir central(A), deux collecteurs annulaires (réservoir périphérique produit (B) et réservoir de retour d'air des bouteilles en phase de soutirage (C)) sur la quelle sont montées toutes les soupapes de soutirage. Les commandes relatives, le système de levage manuel du réservoir (E) et la table (D) sont tous placés sur le tambour de la machine.

- **Réservoir central (A) :**

Le réservoir est positionné dans la partie centrale du carrousel, il se trouve au dessus du presse-étoupe (W) et au-dessous du collecteur supérieur (Z). En phase de production, il contient du produit et un relais de niveau (S) installé sur le collecteur supérieur relève le niveau de produit.

- **Réservoir périphérique du produit (B) :**

Le réservoir est de type annulaire, il reçoit les tuyaux d'entrée du produit qui partent d'un anneau sur lequel sont montés le réservoir central et le presse-étoupe (W) [6].

- **Réservoir de retour d'air (C) :**

Ce collecteur annulaire à chambre unique reçoit l'air contenu dans les bouteilles qui arrive du conteneur en passant à travers les vannes de remplissage. Une série de tuyaux relie le réservoir avec le collecteur supérieur (Z).

- **Le collecteur supérieur (Z) :**

Il alimente le carrousel de soutirage en :

- Retour air des bouteilles
- Retour liquide hygiénisant.

- **Presse-étoupe (W) :**

Il alimente le carrousel de soutirage en :

- Produit (eau)
- Liquide hygiénisant.

#### **II.4.2. Les différentes phases de remplissage**

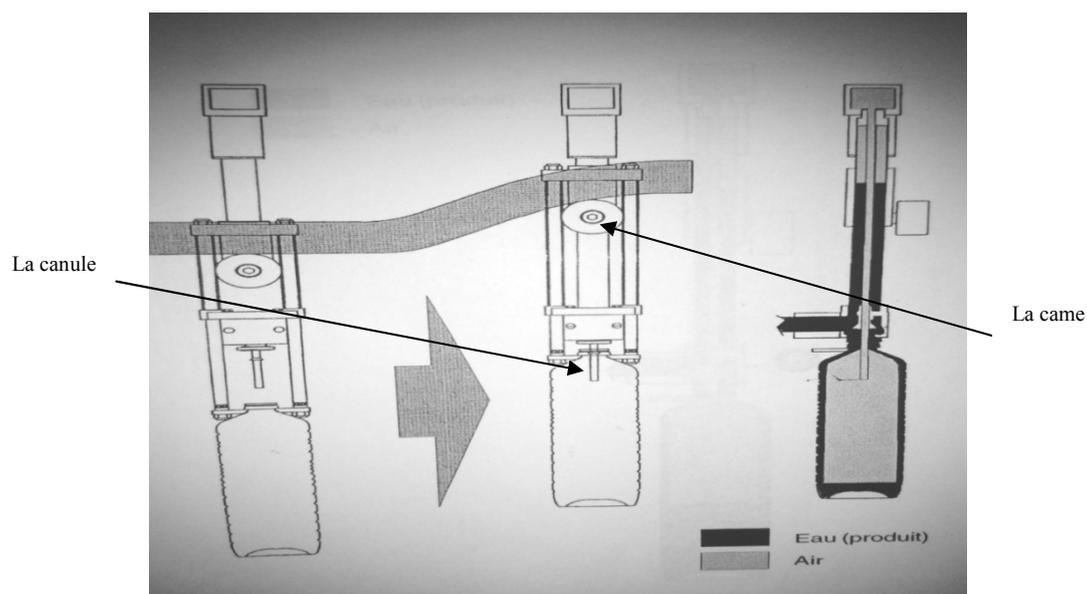
Le remplissage de la bouteille par gravité à pression atmosphérique comporte les trois phases suivantes :

##### **1- Positionnement :**

La bouteille vide est soulevée par la pince de la sellette voir figure (II.13), cette sellette monte puis elle descend en suivant le parcours d'une came. En montant, le goulot de la bouteille vient s'appuyer sur le joint d'étanchéité prévu à cet effet sur le goulot, lors de la montée, la bouteille est pénétrée par une canule (tube inox) au centre du bec dont la longueur correspond au niveau haut de liquide dans la bouteille.

##### **2- Remplissage :**

Poussée par la bouteille la vanne du produit s'ouvre par compression d'un ressort et le remplissage par gravité commence.



**Figure II.13 : Les phases de remplissage [6]**

### 3- fin de remplissage :

L'opération de remplissage est terminée lorsque le produit a éteint le bord inférieur de la canule interrompant ainsi le retour d'air dans le réservoir d'air des bouteilles et la vanne de remplissage se ferme par le rappel du ressort à la décente de la sellette.

#### II.4.3. Le contrôle de niveau du réservoir principal (A)

Le contrôle de niveau dans le réservoir principal est basé sur un procédé tout ou rien qui comporte un relais de control de niveau et une vanne tout ou rien [6].

##### a- Le relais de contrôle de niveau :

Les relais de contrôle de niveau de liquide sont conçus pour mesurer et contrôler les niveaux de liquides conducteurs par l'intermédiaire de sonde résistives.

Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure de la résistance apparente du liquide entre deux sondes immergées. Lorsque cette valeur est inférieure à la valeur de seuil définie sur la face avant de l'appareil, le relais change d'état. Pour éviter les phénomènes d'électrolyse, un courant alternatif traverse les sondes.

Un sélecteur situé sur la face avant permet de sélectionner la fonction désirée et la gamme de sensibilité. Le contrôle d'un niveau unique peut être obtenu en utilisant le second commutateur de sélection. Dans ce cas, la sonde maxi reste en l'air et une temporisation réglable évite tout effet de vague. Les deux produits activent leur relais de sortie lorsqu'un réservoir fait l'objet soit d'une vidange, soit d'un remplissage [9].

La figure ci-dessous présente le relais de niveau de notre installation :

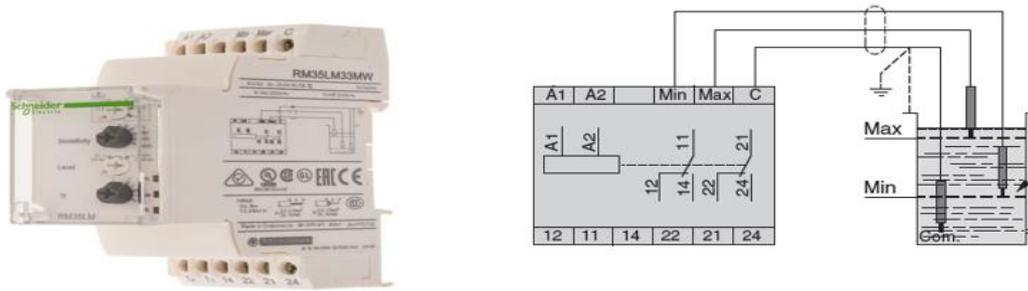


Figure II.14 : Relais de contrôle de niveau [10]

**b- Contrôle de niveau, fonction de remplissage :**

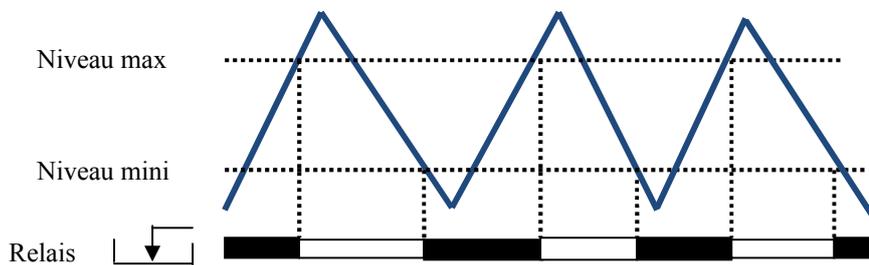


Figure II.15 : Fonction remplissage

**c- Diagramme fonctionnel :**



**d- Fonction remplissage :**

Tant que le niveau du liquide n'a pas atteint la sonde max, le relais de sortie reste enclenché. Dès que le niveau maxi est atteint, le contact s'ouvre et le pompage s'arrête et la vanne TOR se ferme. Dès que le niveau descend sous le niveau min, le contact se ferme à nouveau et la vanne s'ouvre et le pompage reprend de façon à faire remonter le niveau du liquide.

Le pompage de l'eau est assuré par une pompe centrifuge.

**e- Vannes Tout ou Rien :**

Ce sont des vannes de régulation qui ont deux positions, soit ouverte, soit fermée. Elles sont utilisées pour la commande des systèmes ayant une grande inertie ou la précision de la régulation n'est pas importante. Ces vannes sont utilisées pour contrôler le débit des fluides

en (T.O.R). Elles exécutent une action discontinue qui prend deux positions ou deux états 0 et 1 (ou 0 et 100), c'est-à-dire ouverte ou fermée [11].

La figure ci-dessus présente la vanne TOR de notre installation :



**Figure II.16 :** Vanne tout ou rien.

## **II.5. Problématique**

L'ancien système de remplissage de l'eau minéral présente un inconvénient majeur, à savoir :

- Niveau non stable dans la cuve (réservoir principal).

La variation ou l'instabilité du niveau dans la cuve est dû au contrôle de ce dernier par un procédé tout ou rien, (voir Figure (II.15)). Cela a une influence directe sur le niveau d'eau dans la bouteille, autrement dit, le niveau du liquide dans la bouteille dépend de la pression hydrostatique dans la cuve qui est directement proportionnelle à la hauteur d'eau dans celle-là (niveau).

Cela signifie que :

- La pression est d'autant plus grande que le niveau est grand.
- La pression est d'autant plus faible que le niveau est faible.

Lorsque le niveau dans le réservoir principal dépasse une certaine limite il provoque un débordement au niveau de la bouteille et dans le cas où il est inférieur à une certaine limite il provoque une insuffisance de remplissage.

Pour un bon fonctionnement de la machine il est nécessaire d'avoir un niveau stable dans la cuve et aussi dans la bouteille.

Alors : «*comment peut-on avoir un niveau stable dans la cuve?*».

## **II.6. Cahier des charges**

Notre objectif est d'assurer un niveau stable dans la cuve et dans la bouteille, il faut que :

- La variation de niveau dans la cuve ne dépasse pas 1% par apport à une consigne.
- L'actionneur à utiliser doit avoir un comportement stable et une réaction rapide au temps possible.

## **II.7. Conclusion**

La connaissance parfaite d'un système est une étape majeure pour pouvoir apporter des solutions ou améliorer ce dernier.

Pour maintenir un niveau constant d'un liquide dans une cuve, un opérateur doit observer le niveau de liquide, le comparer à un repère donné, c'est la consigne, réagir en conséquence en ouvrant ou en fermant la vanne de remplissage de la cuve. La commande automatique de ce principe s'appelle **la régulation**.

# *CHAPITRE III*

### III.1. Introduction

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon les critères prédéfinis par un cahier de charges. Bien que les outils et méthodes soient communs aux régulations et aux asservissements il est préférable de définir ces termes :

- ✚ **Régulation** : une grandeur physique doit être maintenue à un niveau constant en dépit de la présence de perturbations [12].
- ✚ **Asservissement** : une grandeur physique doit suivre une évolution temporelle imposée par l'utilisateur du système.

### III.2. Critères de performance d'une régulation

Les qualités exigées les plus rencontrées industriellement sont la stabilité, la précision et la rapidité d'une grandeur à réguler.

#### III.2.1. Stabilité

Un système est stable si et seulement la grandeur physique réelle à réguler reste bornée lorsque l'on injecte un signal borné à son entrée. Dans la pratique, on exige que le signal de sortie converge effectivement vers une valeur finie. D'une manière plus générale, aucun signal dans la boucle de régulation ne doit osciller ou tendre vers l'infini [13].

Dans une approche simplifiée, un système est considéré comme stable si, pour une grandeur à maîtriser se stabilise à une valeur finie. Plus le régime transitoire d'un système soumis à une telle variation est amorti plus il est stable. Le degré de stabilité est alors caractérisé par l'amortissement de ce régime transitoire.

Les figures suivantes présentent les réponses des systèmes à un échelon :

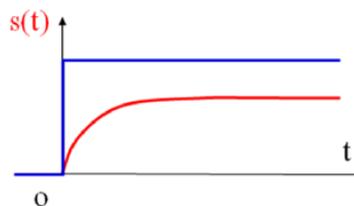


Figure III.1 : Allure de la réponse d'un système stable à un échelon

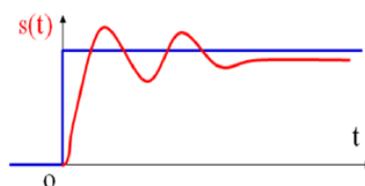
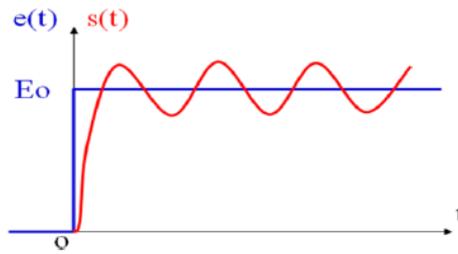


Figure III.2 : Allure de la réponse à un échelon d'un système stable après oscillation



**Figure III.3 :** Réponse à un échelon d'un système non stable (oscillatoire) [14]

### III.2.2. Précision

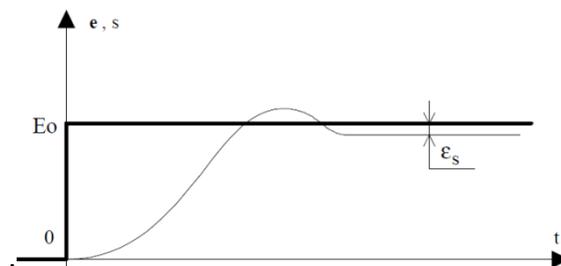
Elle est définie principalement par deux grandeurs qui sont soit calculées si le système est modélisé, soit mesurées expérimentalement : l'écart statique et l'écart dynamique.

#### + L'écart statique :

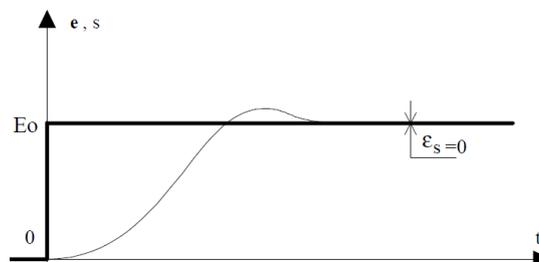
Pour caractériser l'écart statique, on soumet le système considéré à une entrée en échelon d'amplitude constante :  $e(t) = E_0 \cdot u(t)$  représentée en trait fort sur les figures ci-dessous. La réponse du système  $s(t)$  est représentée en trait fin. En général, la réponse se stabilise au bout d'un certain temps (sinon il est instable) : c'est le régime permanent.

L'écart statique est la différence entre la valeur visée et la valeur atteinte en régime permanent.

Les figures III.4 et III.5 montrent deux types de réponse à un échelon.



**Figure III.4 :** Système à écart statique non nul [14]



**Figure III.5 :** Système à écart statique nul

### ✚ L'écart dynamique :

Pour caractériser l'écart dynamique, on soumet le système considéré à une entrée rampe de pente «  $a$  » :  $e(t) = a \cdot t$  (t) représentée en trait fort sur les figures (III.6 et III.7.) De même que précédemment on considère la réponse en régime permanent. L'écart dynamique est la différence entre la consigne et la réponse en régime permanent. On l'appelle également écart de traînage ou écart de poursuite [14].

Les figures (III.6 et III.7) montrent deux types de réponse à une rampe.

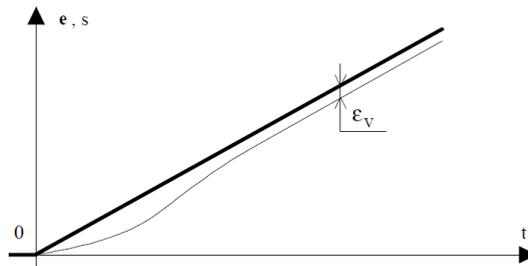


Figure III.6 : Système à écart dynamique constant

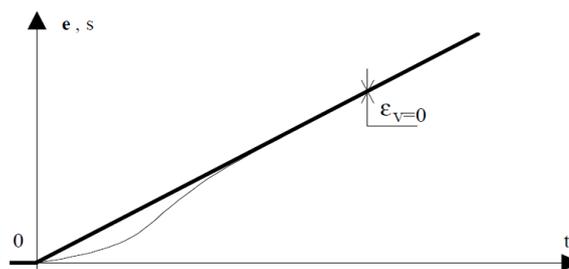


Figure III.7 : Système à écart dynamique nul [14]

### III.2.3.Rapidité

#### ✚ Le temps de réponse à 5% :

En pratique, on mesure (ou on calcule) le temps que met la réponse à rester dans une zone comprise entre plus ou moins 5% de la valeur visée.

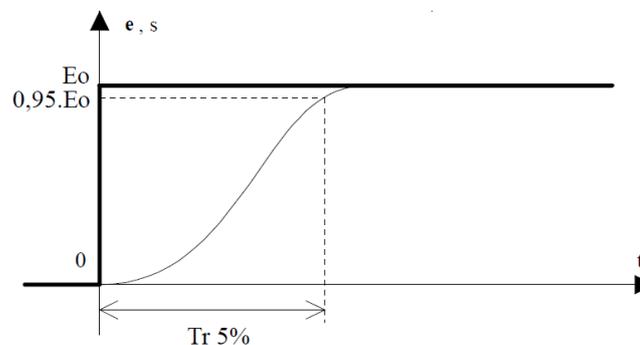


Figure III.8 : Temps de réponse à 5% d'un système non oscillant

Pour un système oscillant, le temps de réponse n'est pas le temps au bout duquel la réponse atteint 95% de la valeur visée mais le temps au bout duquel la réponse reste définitivement dans la zone  $(0,95 \text{ } \sigma \text{ } / \text{ } 1,05 \text{ } \sigma \text{ })$ . On peut immédiatement remarquer que plus le système est oscillant, plus son temps de réponse augmente :  $Tr_{5\%}$  traduit le compromis rapidité/stabilité.

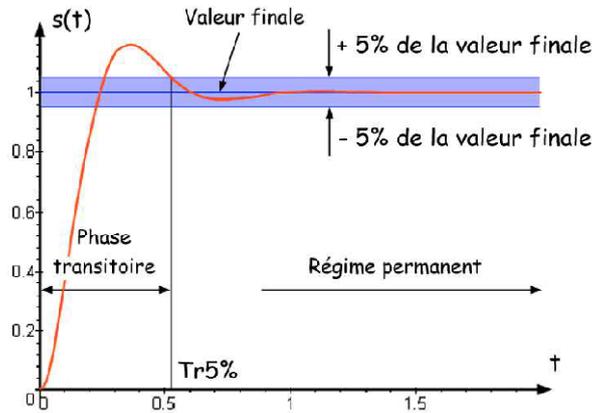


Figure III.9 : Temps de réponse à 5% d'un système non oscillant [15]

#### ✚ Le temps de montée :

Le temps de montée est défini comme étant le temps  $t_m$  au bout duquel le signal de sortie franchit pour la première fois son asymptote. La raison pour laquelle ce paramètre est très souvent retenu est la suivante : si l'objectif est d'atteindre rapidement la valeur finale du signal de sortie, l'instant  $t_m$  correspond de toute évidence à l'instant pour lequel l'objectif est atteint [13].

#### III.2.4. Amortissement

Un bon amortissement est la capacité d'un système oscillant à être suffisamment amorti et à ne pas présenter de dépassement important. Cela signifie deux choses :

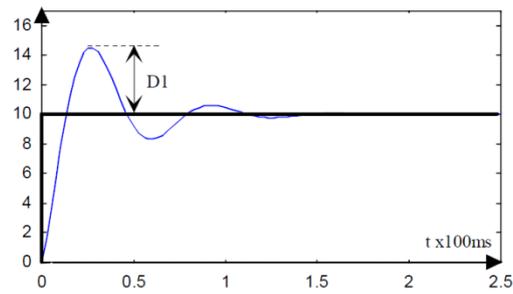
- ✓ Le premier pic de la réponse ne devra pas dépasser de manière trop importante la valeur visée : on demande alors au dépassement de rester inférieur à 10% de la consigne.
- ✓ Le nombre d'oscillations avant stabilisation devra être faible : cela permet de ménager la mécanique.

L'amortissement correspond physiquement à des pertes d'énergie : frottement en mécanique, courants de Foucault en électricité... etc. Les performances sont alors diminuées.

Le critère de "bon amortissement" correspond aux types de réponses représentées sur les figures (III.11 et III.12).

Qualitativement, on peut distinguer quelques cas d'amortissement :

**Cas 1** : Réponse insuffisamment amortie :

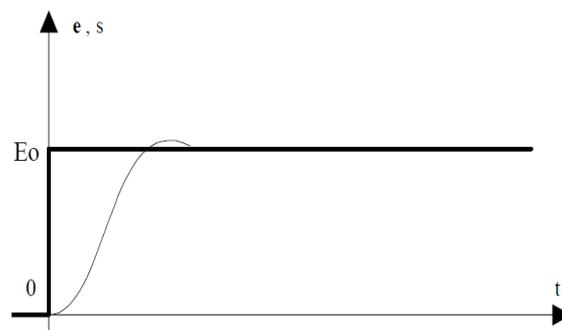


**Figure III.10** : Réponse insuffisamment amortie [14]

**Constations :**

- ✓ Dépassement  $D1$  trop important.
- ✓ Temps de réponse trop grand.
- ✓ Oscillations mécaniques dangereuses.

**Cas 2** : Réponse correctement amortie :

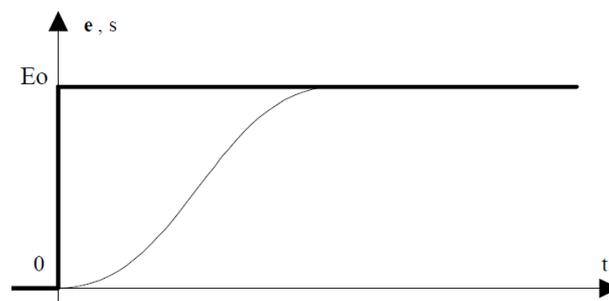


**Figure III.11** : Réponse correctement amortie

**Constations :**

- ✓ Dépassement  $D1$  faible.
- ✓ Temps de réponse petit.
- ✓ Pas d'oscillations.

**Cas 3** : Réponse bien amortie sans dépassement :



**Figure III.12** : Réponse bien amortie sans dépassement [14]

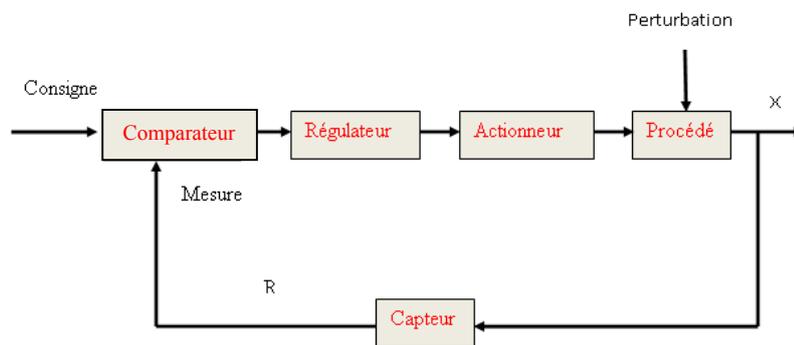
**Constations :**

- ✓ Dépassement D1 nul.
- ✓ Temps de réponse peu long, mais acceptable.
- ✓ Pas d'oscillations.

**III.3. Eléments constituant d'une boucle de régulation**

La grandeur à réguler est mesurée de façon continue et est en suite comparée avec une valeur donnée en entrée du système. La régulation devra, en fonction du résultat de la comparaison, rapprocher la valeur à réguler de celle donnée en entrée.

La figure suivante illustre le schéma général d'une boucle de régulation :



**Figure III.13 :** Schémas d'une boucle régulation.

**III.3.1. La sortie X**

Elle est le résultat de la régulation, la variable que le système va influencer et/ou essayer de garder constante. Dans l'exemple d'une régulation de niveau, ce serait le niveau dans une cuve. Cette variable est la valeur réelle de la grandeur mesurée.

**III.3.2. Le retour R**

Dans une boucle de régulation, la sortie est constamment contrôlée, il est ainsi possible de réagir à toute variation indésirable de celle-ci. La valeur mesurée (proportionnelle à la sortie) est appelée retour (ou mesure). Dans l'exemple d'une régulation de niveau cette valeur correspondrait au courant de mesure de la sonde capacitive.

**III.3.3. La consigne**

La consigne est la grandeur qui doit commander la sortie, c'est à dire la valeur vers laquelle celle-ci doit tendre, pour finalement l'égaliser. Si la consigne est constante, la sortie doit le rester (comportement statique).

### III.3.4. La perturbation

La perturbation est la grandeur qui influe de manière indésirable sur la sortie et qui l'éloigne de la valeur souhaitée (consigne). La seule existence d'une perturbation rend nécessaire la mise en œuvre d'une régulation statique.

### III.3.5. Le comparateur

C'est l'endroit où la mesure actuelle de la sortie et la valeur de la consigne sont comparées. Dans la plupart des cas, les deux grandeurs sont des tensions. La différence des deux grandeurs ainsi obtenues est appelée erreur.

### III.3.6. Le régulateur

Le régulateur est l'élément central d'une régulation. Il évalue l'erreur calculée par le comparateur, c'est à dire l'écart entre la sortie et la consigne, et on déduit à partir de celle-ci une valeur régulée ou valeur de correction à transmettre au procédé, afin de corriger la sortie.

La façon (l'algorithme) dont le régulateur calcule la valeur régulée à partir de l'erreur est la principale activité de la régulation.

### III.3.7. L'actionneur

L'actionneur est en quelque sorte l'organe exécutif de la régulation. Il reçoit la variable régulée du régulateur. Cette variable d'entrée lui permet de savoir comment il doit influencer sur la sortie de la régulation [16].

### III.3.8. Le procédé

Le procédé est le cœur du système régulé. C'est également la partie qui agit directement sur la valeur de sortie.

## III.4. Les correcteurs de base de la régulation PID

Tout système à réguler possède un régulateur. Ces régulateurs agissent sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

Les différentes combinaisons des actions de base de la régulation PID conduisent aux différentes appellations :

- ✓ Régulateur *PI* : Action P + Action I.
- ✓ Régulateur *PD* : Action P + Action D.
- ✓ Régulateur *PID* : Action P + Action I + Action D.

### III.4.1. Analyse des correcteurs de base $P$ , $I$ et $D$

#### a. Analyse de l'action $P$ :

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système à réguler et permet donc d'améliorer notablement la rapidité, la précision et la stabilité.

La loi de commande  $S(t)$  est proportionnelle à l'écart  $(t)$  entre la consigne  $C(t)$  et la mesure  $M(t)$  [17] :

$$S(t) = k_p (t) = k_p (C(t) - M(t))$$

$k_p$  : est le gain statique.

$$(t) = (C(t) - M(t)) \text{ Erreur statique}$$

Dans le cas d'un régulateur  $P$ , la variable régulée est toujours proportionnelle à l'erreur calculée. Il en résulte qu'un régulateur  $P$  réagit sans temps de retard à tout écart entre la sortie et la consigne, et seul dans ce cas sera générée une valeur régulée.

Les figures (III.14 et III.15) représentent les réponses d'un système en boucle fermée où le régulateur est de type  $P$  de gain  $k_p$ . Elles permettent d'illustrer qualitativement le comportement transitoire et permanent en fonction du choix de  $k_p$ .

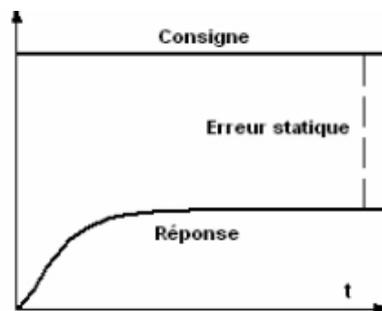


Figure III.14 : Réponse d'un système pour un faible gain

Si cette action est faible, on a une réponse lente accompagnée d'une grande erreur statique.

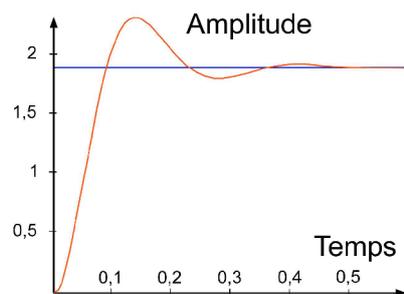


Figure III.15 : Réponse d'un système pour un fort gain [15]

Si cette action est importante, on obtient une action rapide mais avec risque de dépassement et d'oscillation. Par contre, l'erreur statique est plus faible.

### b. Analyse de l'action I :

Un régulateur de type intégral permet de compenser une erreur de régulation constante. Tant que l'erreur n'est pas nulle, la valeur de la variable régulée est ajustée. La régulation se termine lorsque la sortie atteint la valeur de la consigne ou que la variable régulée atteint un seuil maximal fixé par les propriétés du système ( $U_{\max}$ ,  $P_{\max}$  ... etc.).

Pour un intégrateur pur, la loi de commande  $S(t)$  est de la forme [17] :

$$S(t) = \frac{1}{T_i} * \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

$\varepsilon(t)$ : Erreur statique.

$\frac{1}{T_i}$  : Constante de temps d'intégration.

Le coefficient ( $\frac{1}{T_i}$ ) agit comme un gain et sa valeur affecte le comportement transitoire de la boucle fermée. Les figures III.16 et III.17 permettent d'illustrer l'effet de la constante d'intégration  $\frac{1}{T_i}$  sur le comportement transitoire dans un système régulé. Théoriquement on note que l'erreur statique est nulle en régime permanent quelle que soit cette valeur.

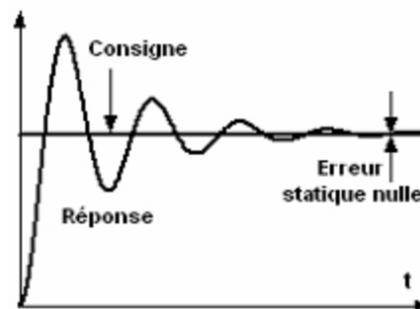


Figure III.16: Réponse d'un système pour  $\frac{1}{T_i}$  grand [17]

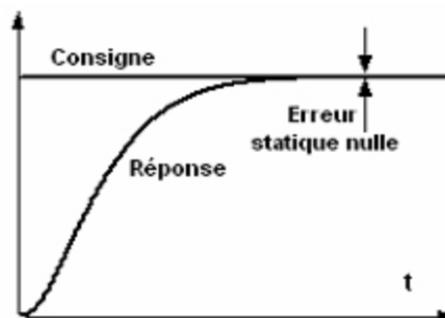


Figure III.17: Réponse d'un système pour  $\frac{1}{T_i}$  faible [17]

### c. Analyse de l'action *D* [15] :

Le régulateur dérivé établit une valeur régulée en fonction de la vitesse de variation de l'erreur et pas en fonction de l'amplitude comme pour le régulateur *P*. C'est pour cette raison qu'il réagit beaucoup plus rapidement qu'un régulateur *P*. Même face à une petite erreur il va générer une grosse valeur régulée dès lors qu'il y a une variation d'amplitude de l'erreur. Le régulateur *D* sera inefficace face à une erreur résiduelle permanente, quel que soit sa valeur puisque celle-ci reste constante (pas de variation d'amplitude donc pas de réaction du régulateur). C'est pourquoi ce type de régulateur sera rarement utilisé seul dans la pratique, il est couramment associé à un régulateur de type *P*.

La loi de commande  $S(t)$  est de la forme [17] :

$$S(t) = T_d * \frac{d \varepsilon (t)}{d t}$$

$T_d$  : Constante de temps de dérivation.

$\varepsilon (t)$  Erreur dynamique.

### III.4.2.Synthèse sur les actions *PID*

Tableau III.1 : Synthèse sur les actions *PID* [18]

Action	Points forts	Points faibles
P	Action instantanée	Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire
I	Annule l'erreur statique	Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)
D	Action très dynamique Améliore la rapidité Apporte un effet Stabilisant	Forte sollicitation de l'organe de commande

### III.4.3.Régulateur de type *PI*

Le régulateur de type *PI* est l'un des plus utilisés dans la pratique. Il s'agit d'un couplage parallèle entre un régulateur proportionnel et un régulateur intégral (Figure III.18). S'il est correctement paramétré, le régulateur *PI* cumule les avantages des deux régulateurs proportionnel et intégral (stable, rapide, faible erreur résiduelle), tout en compensant leurs désavantages respectifs. La loi de commande  $S(t)$  est de la forme [18] :

$$S(t) = k_p * \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} * \int_0^t \varepsilon (t) d t$$

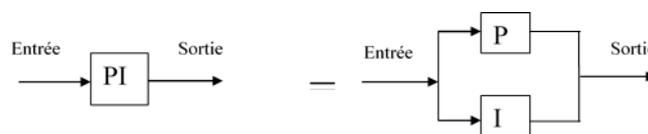


Figure III.18 : Structure d'un régulateur *PI*

### III.4.4. Régulateur de type PID

Le régulateur universel *PID* s'obtient donc en ajoutant une composante de type *D* à un régulateur *PI*. La partie dérivée assure une plus grande rapidité pour atteindre la valeur de consigne en ajoutant une action anticipatrice au régulateur. La loi de commande  $S(t)$  est de la forme [18] :

$$S(t) = k_p * \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} * \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d * \frac{d \varepsilon(t)}{dt}$$

La figure (III.19) illustre qualitativement l'influence de l'ajout de l'action *D* sur le comportement transitoire dans une boucle possédant déjà les actions *P* et *I*. On note clairement l'effet stabilisant de l'action *D*.

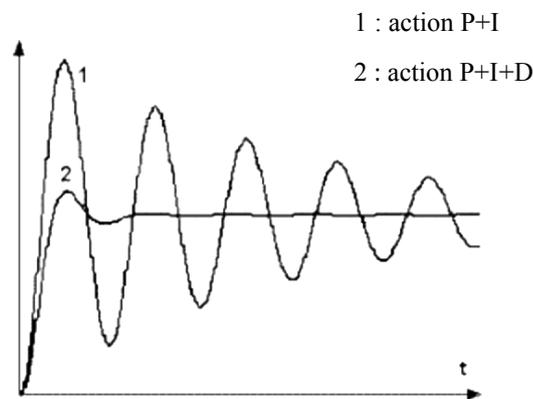


Figure III.19 : L'influence de l'ajout de l'action *D* pour un régulateur *PI* [17]

### III.5. Méthodes de réglages des paramètres du régulateur *PID*

Le problème de la détermination des régulateurs est connu par la synthèse des systèmes bouclés. Les méthodes de synthèse sont très nombreuses et une classification rigoureuse n'est pas une tâche facile. Néanmoins, on distingue les deux types de méthodes :

- ✚ **Les méthodes dites empiriques** : ne nécessitant pas une connaissance parfaite du modèle du procédé à commander. Les paramètres du régulateur seront calculés à partir des observations expérimentales sur le procédé (relevé de la réponse indicielle par exemple). L'intérêt majeur de ces méthodes réside dans leur simplicité. Elles sont largement utilisées dans le domaine industriel et elles sont dans la plupart des cas suffisantes mais ne permettent pas un réglage fin.
- ✚ **Les méthodes basées sur la connaissance du modèle du système** : sous forme de fonction de transfert par exemple. Les actions du régulateur seront calculées de façon à obtenir la fonction de transfert souhaitée en boucle ouverte ou en boucle fermée [17].

### III.6. Mise au point d'une boucle de régulation de niveau

L'objectif principal de ce thème est de créer une régulation de niveau avec une erreur maximale ne dépassant pas 1%. Pour cela, le choix des types de composants (vanne et sonde) est crucial pour obtenir une bonne réponse du système.

L'autre étape majeure est la création du *PID*, ce dernier doit absolument respecter le cahier de charges en termes de performances. Pour ce faire, le *PID* conçu doit être scindé en deux parties qui seront expliquées plus loin dans ce chapitre.

#### III.6.1. Moyen matériel à utiliser

- ✓ Automate siemens s7-300.
- ✓ Module de sortie analogique 4...20mA.
- ✓ Module d'entrée analogique 4...20mA.
- ✓ Sonde de niveau capacitive Liquicap FMI51 (endress hauser).
- ✓ Vanne modulante BURKERT Type 8630.

#### III.6.2. Moyen logiciel à utiliser

- ✓ TIA V11 (STEP 7) : pour la conception et la programmation du *PID*.
- ✓ TIA V11 (WINCC) : pour la conception d'une interface de visualisation et interaction homme machine.

### III.7. Identification et caractéristiques des moyens matériels utilisés

Avant de parler sur l'automatisation de notre boucle de régulation, il faut identifier les éléments constituant cette boucle.

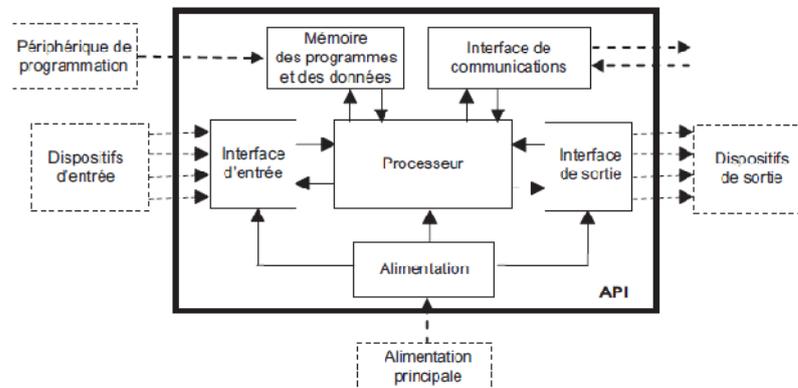
#### III.7.1. Elément de commande et de gestion de la régulation

##### Automate programmable industriel (PLC ou API) :

C'est une forme particulière de contrôleur à microprocesseur qui utilise une mémoire programmable pour stocker les instructions et qui implémente différentes fonctions, qu'elles soient logiques, de séquençement, de temporisation, de comptage ou arithmétiques, pour commander les machines et les processus. La programmation de l'API concerne principalement la mise en œuvre d'opérations logiques et de commutation.

L'automate programmable reçoit les informations relatives à l'état du système grâce à ses entrées puis il commande les pré-actionneurs suivant le programme inscrit dans sa mémoire grâce à ces sorties. Un API est composé donc de quatre grandes parties (Figure III.20) :

- ✓ Le processeur.
- ✓ La mémoire.
- ✓ Les interfaces Entrées/sorties et de communication.
- ✓ Une alimentation 230 V, 50/60 Hz (AC) - 24 V (DC).



**Figure III.20 :** Structure interne d'un Automate Programmable Industriel [19]

#### a. Présentation de l'automate siemens s7-300 :

La famille S7-300 est constituée d'automates programmables, de conception modulaire, utilisés pour des automatismes de gamme et peuvent être connectés entre eux au moyen d'un câble-bus PROFIBUS.

L'automate S7-300 de notre installation consiste en une CPU, un module d'alimentation PS, des modules de signaux d'entrée, des modules de signaux de sortie [20].

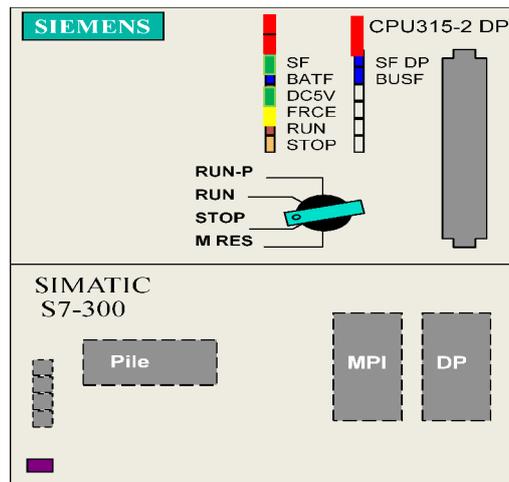


**Figure III.21 :** Constitution de l'API s7-300 de notre installation

#### b. Présentation de la CPU S7-300 :

La gamme S7-300 offre une grande variété de CPU telles que CPU312, 314M, 315, 315-2P...etc. Chacune possède certaines caractéristiques différentes des autres. Par conséquent, le choix de la CPU, pour un problème d'automatisation donné, est conditionné par les caractéristiques offertes par la CPU choisie.

La figure III.22 présente la CPU 315-2 DP d'un automate s7-300.



**Figure III.22 :** CPU d'un automate S7-300

- ✚ **Interface (MPI) :** Une liaison MPI (Multi Point Interface) est nécessaire pour programmer un SIMATIC S7-300 depuis le PC. Elle est une interface de communication utilisée pour la programmation, le contrôle-commande avec HMI et l'échange de données entre CPU CIMATIC S7 jusqu'à 32 nœuds maximum. Chaque CPU du SIMATIC S7-300 est équipée d'une interface MPI intégré.
- ✚ **Interface (DP) :** (Interface PROFIBUS) Elle autorise une vitesse de transmission maximale de 12 M Bauds.
- ✚ **La pile :** Elle permet de sauvegarder le contenu de la RAM en cas de coupure du courant.
- ✚ **Signification d'état et de défaut :** La CPU comporte des LED de signalisation suivante :
  - ✓ SF (rouge) : signalisation groupée de défauts qui s'allume si on a des défauts matériels ou des erreurs de programmation, de paramétrage, de calcul...etc.
  - ✓ BATF (rouge) : défaut pile qui s'allume si elle est défectueuse, absente ou déchargée.
  - ✓ DC5V (verte) : alimentation 5Vcc pour la CPU et le bus S7-300 qui s'allume si les 5V sont présents et elle clignote s'il y a surcharge de courant.
  - ✓ FRCE (jaune) : qui s'allume en cas de forçage permanent.
  - ✓ RUN (verte) : état de fonctionnement RUN qui clignote en cas de démarrage de la CPU.
  - ✓ STOP (jaune) : état de fonctionnement STOP qui s'allume si la CPU ne traite aucun programme utilisateur et clignote en cas ou la CPU demande un effacement général.
- ✚ **LED de visualisation pour PROFIBUS :**
  - ✓ BUSF (rouge) : défaut du matériel ou du logiciel au niveau de l'interface.

### ✚ Commutateur de mode :

- ✓ RUN-P (mode de fonctionnement RUN programme) : la CPU traite le programme utilisateur et la clé ne peut pas être retirée. Il est possible de lire le programme de la CPU avec une PG (CPU vers PG) et de transférer des programmes dans la CPU (PG vers CPU).
- ✓ RUN (mode de fonctionnement RUN) : la CPU traite le programme de l'utilisateur. Dans cette position, la clé peut être retirée pour éviter qu'une personne non habilitée change le mode de fonctionnement.
- ✓ STOP (mode de fonctionnement STOP) : la CPU ne traite aucun programme utilisateur, la clé peut être retirée pour éviter le changement de mode inattendue mais on peut lire et écrire dans la CPU.
- ✓ MRES : c'est position instable du commutateur de mode de fonctionnement, en vue de l'effacement général de la CPU. Le contenu de la mémoire de chargement rémanente intégré reste inchangé après un effacement général.

## III.7.2. Eléments de traitement des signaux analogiques

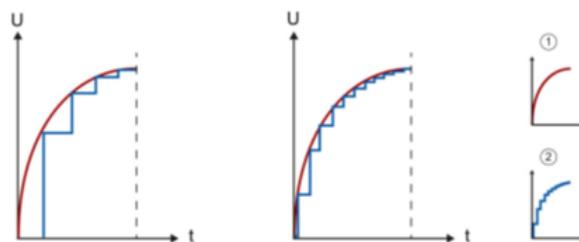
**a. Module d'entrées analogiques** : convertit un signal de processus analogique en un signal numérique.

**b. Module de sorties analogique** : convertit un signal de sorties numériques en un signal analogique.

Les signaux analogiques peuvent prendre toutes les valeurs contenues dans une plage définie. Comme dans notre cas la *grandeur analogique* est le *niveau d'eau dans la cuve* qui *varie* dans *une plage de valeur définie*, par exemple entre *0* et *80l*.

### c. Approximation d'une valeur analogique :

La figure suivante illustre l'approximation d'une valeur analogique par une courbe en escalier :



1 : valeur analogique, 2 : valeur numérique

**Figure III.23** : Approximation d'une courbe analogique par une courbe en escalier [21]

### III.7.3. Elément de mesure du niveau

La sonde de niveau capacitive (Figure III.24 et 25) est l'élément responsable de la mesure du niveau d'eau dans la cuve. C'est une famille de capteur utilisant l'effet capacitif pour détecter une variation de faibles distances [22].

Le principe de la mesure de niveau par une sonde capacitive est basé sur la variation de capacité d'un condensateur. Une sonde isolée (à tige ou à câble) et la cuve forment un condensateur dont la capacité dépend du niveau de remplissage : une cuve vide a une capacité plus faible, alors qu'une cuve pleine donne une capacité plus élevée. La capacité mesurée est proportionnelle au niveau.

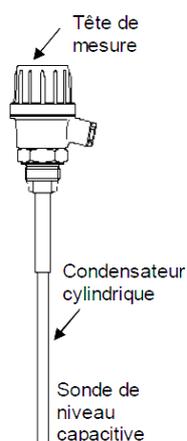


Figure III.24 : Sonde de niveau capacitive



Figure III.25 : Sonde capacitive Liquicap FMI51 [22]

#### a. Présentation de la sonde capacitive Liquicap FMI51 (endress hauser)

Le liquicap FMI51 (Figure III.25) est une sonde à tige entièrement isolée fiable pour la surveillance continue du niveau dans les liquides, notamment dans les liquides colmatant et les températures extrêmement élevées. La mesure est indépendante du coefficient diélectrique(CD).

#### b. Motivations du choix de la sonde capacitive Liquicap FMI51

La principale raison du choix de cette sonde est ses caractéristiques citées dans le tableau ci-dessous qui correspondent bien à notre système.

Tableau III.2 Caractéristiques de liquicap FM151

Précision	0.1%
Spécialité	Temps de réaction court l'ors du changement de valeur
Distance de mesure max	4m
Température de process	-80 °C...200 °C
Communication	4...20mA

### III.7.4. Actionneur

L'élément jouant le rôle d'actionneur dans notre installation est la vanne modulante burkert type 8630. Cette dernière est un dispositif actionné mécaniquement qui modifie la valeur du débit de fluide dans un système de commande de processus. Ce dispositif est constitué d'une vanne reliée à un actionneur capable de faire varier la position d'un organe de fermeture dans la vanne, ou obturateur, en réponse à un signal du système de commande.

L'actionneur peut être commandé par une énergie pneumatique, électrique, hydraulique ou toute combinaison de ces énergies. Le choix du type d'énergie est essentiellement lié à des problèmes de puissance, de temps de réponse, de disponibilité, d'habilité et du coût [11].

#### a. Définitions, caractéristiques de construction des vannes modulantes [23] :

- ✚ **Pression nominale  $P_n$**  : Pression, pour laquelle le corps de vanne est dimensionné. Les matériaux des corps, les températures de fluide, certaines dimensions sont par exemple normalisées en fonction de la pression nominale.
- ✚ **Pression de fonctionnement  $P_{e m a x}$**  : Pression maximale admissible à laquelle la vanne peut être soumise. Cette pression peut dépendre de la température.
- ✚ **Pression de fermeture** : Pression différentielle maximale admissible sur la vanne fermée. Lorsque la pression de fermeture n'est pas mentionnée, elle correspond à la pression différentielle  $\Delta P_{m a x}$
- ✚ **Pression différentielle  $\Delta P_{m a x}$**  : Perte de charge maximale permettant encore une régulation progressive de l'organe de réglage. Si  $\Delta P_{m a x}$  est dépassé, le comportement de la vanne peut en être affecté, des bruits peuvent apparaître et les pièces intérieures usent rapidement.
- ✚ **Valeur  $K_v$**  : La valeur  $K_v$  indique le débit en m<sup>3</sup>/h d'un fluide de densité  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  et de viscosité cinématique  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , sous une pression différentielle de 1bar, à travers une vanne pour une course H donnée.
- ✚ **Valeur  $K_v$  (taux de fuite)** : Elle représente la valeur de  $K_v$  pour H=0, elle correspond donc au taux de fuite.
- ✚ **Valeur  $K_{vs}$**  : Il s'agit de la valeur  $K_v$  prévue pour un modèle de vannes pour une course nominale (100 %).

**b. L'autorité de la vanne [24] :**

La fonction principale d'une vanne de régulation est d'assurer la progressivité d'un débit. C'est l'autorité de la vanne qui va déterminer la stabilité de la régulation.

Cette progressivité sera quantifiée par l'autorité de la vanne :

$$a = \frac{\Delta p_v}{\Delta p_l + \Delta p_v}$$

$\Delta p_v$  = perte de charge de la vanne entièrement ouverte pour le débit nominal.

$\Delta p_l$  = perte de charge du circuit à débit variable

**c. Présentation de la vanne modulante burkert type 8630 :**

La photo ci-dessous montre la vanne modulante (**burkert type 8630**) utilisée dans la nouvelle installation.



**Figure III.26:** Vanne modulante burkert type 8630

**d. Raisons du choix de la vanne modulante burkert type 8630 :**

Les vannes modulantes existent sous différents modèles adaptés à chaque application. Dans les circuits à pompe comme dans notre cas, elles sont préférables à siège droit, et c'est le cas de la vanne burkert type 8630 qu'on a utilisé. Elle est aussi précise et fiable [25]. Et puisque on cherche à atteindre une précision inférieure à 1%, cette vanne est le choix idéal.

**III.8. Présentation des moyens logiciels utilisés**

Pour la mise en marche de notre boucle de régulation on a utilisé les logiciels suivants :

### III.8.1. Logiciel utilisé pour la gestion de la régulation (STEP 7)

STEP 7 est le logiciel de base pour la configuration et la programmation des systèmes SIMATIC (s7-300). Il fait partie de l'industrie logicielle SIMATIC. Les tâches de bases qu'il offre à son utilisateur lors de la création d'une solution d'automatisation sont :

- ✓ La création et gestion de projet.
- ✓ La configuration et le paramétrage du matériel et de la communication.
- ✓ La gestion des mnémoniques.
- ✓ La création des programmes.
- ✓ Le test de l'installation d'automatisation.

Il s'exécute sous les systèmes d'exploitation de Microsoft à partir de la version Windows 95. Par conséquent, il s'adapte à l'organisation graphique orientée, objet qu'offrent ces systèmes d'exploitation [26].

#### ✚ Langages de programmation sous STEP7 [27] :

Pour créer un programme sous STEP7, on dispose de trois langages de programmation CONT, LIST ou LOG qui peuvent être combinés dans le même programme. Selon la spécialité du programmeur, il choisira le modèle qui lui convient.

**a. Programmation à schéma logique (LOG) :** Le logigramme (LOG) est un langage de programmation graphique qui utilise les boîtes de l'algèbre de Boole pour représenter les opérations logiques. Les fonctions complexes, comme par exemple les fonctions mathématiques, peuvent être représentées directement combinées avec les blocs logiques.

**b. Programmation à schéma contact (CONT) :** C'est un langage de programmation graphique. La syntaxe des instructions est très semblable aux schémas de circuits électriques. Le langage à CONT permet de suivre facilement le trajet du courant entre les barres d'alimentation en passant par les contacts, les éléments complexes et les bobines.

**c. Programmation à liste (LIST) :** C'est un langage de programmation textuel proche de la machine. Dans cette programmation, les différentes instructions correspondent, dans une large mesure, aux étapes par lesquelles la CPU traite le programme. Pour faciliter la programmation, LIST a été complété par quelques structures de langage évoluées (paramètres de blocs et accès structurés aux données).

### III.8.2. Logiciel utilisé pour la supervision de la régulation (WINCC) [28]

Lorsque la complexité des processus augmente et que les machines et les installations doivent répondre à des spécifications de fonctionnalité toujours plus sévères, l'opérateur a

besoin d'un maximum de transparence. Cette transparence s'obtient au moyen de l'interface homme-machine (IHM).

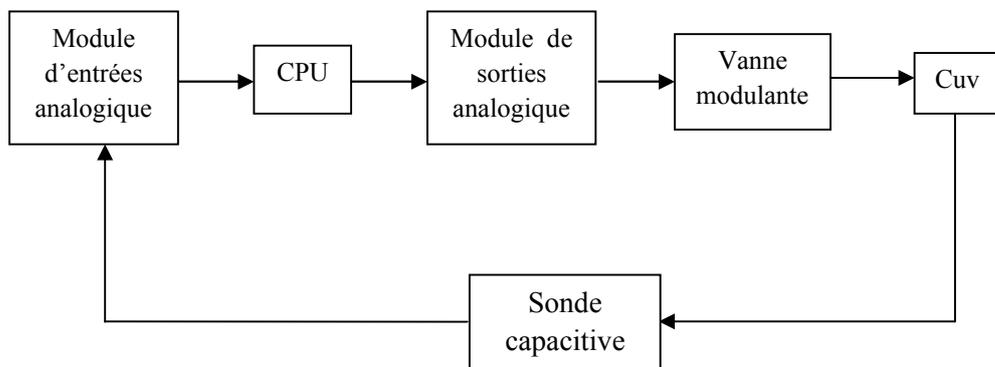
L'IHM constitue l'interface entre l'homme (opérateur) et le processus (Machine/Installation). Le contrôle proprement dit du processus est assuré par le système d'automatisation. Il existe par conséquent une interface entre l'opérateur et le WINCC (Windows Contrôle Center) flexible et entre le WINCC flexible et le système d'automatisation. L'IHM se charge des tâches suivantes :

- a. Visualisation du processus :** le processus est visualisé sur le pupitre opérateur lorsque l'état de ce dernier évolue.
- b. Conduite du processus :** l'opérateur peut contrôler le processus au moyen de l'interface utilisateur graphique. Il peut définir une valeur de consigne pour un automate ou démarrer un moteur par exemple.
- c. Affichage des alarmes :** lorsqu'une anomalie survient, cela déclenche automatiquement une alarme.
- d. Archivage des valeurs du processus et d'alarmes :** Le système IHM peut identifier les alarmes et les valeurs du processus. Cette fonction permet d'enregistrer des séquences de traitement et d'extraire des données de production antérieures.

Le WINCC flexible est le logiciel IHM pour la réalisation, par des moyens d'ingénierie simples et efficaces, des concepts d'automatisation évolutifs au niveau machine. Il réunit différents avantages, simplicité, ouverture et flexibilité.

### III.9. Principe de fonctionnement de la régulation du niveau d'eau dans la cuve

La figure suivante montre le schéma bloc de la régulation de niveau d'eau de notre système :



**Figure III.27 :** Le schéma bloc de la régulation de niveau d'eau de notre système

La régulation se fait grâce à un **régulateur PID numérique** sous forme d'un algorithme implanté dans la CPU de l'automate. Le *PID* fonctionne suivant **deux modes** :

Le **premier mode** du *PID* est le mode **agressif** ; ce terme désigne le fait que le *PID* est très réactif au changement de l'erreur et réagit rapidement dans ses actions. Ce mode est activé quand l'erreur excède 10%.

Le **second mode** communément appelé mode **doux** ; est conçu de tel manières à stabiliser le système et tendre l'erreur vers zéro, ce mode est souple nettement moins rapide que le premier et est utilisé quand l'erreur est inférieure à 5%.

Le **choix des paramètres du régulateur** est basé sur une **méthode empirique** qui est :

- ✓ Dans les premiers temps, on exploite **la réponse indicielle** de notre système pour une **consigne de niveau** exprimée en pourcentage (qui fait partie aussi du programme) avec **une faible valeur du gain  $P$**  tout en mettant  $I=0$  et  $D=0$ .

On **augmente progressivement le gain ( $P$ )** agissant seul jusqu'à l'obtention d'un système **stable** avec un **dépassement et une erreur statique** acceptable.

- ✓ Après une attente de trois minutes pour s'assurer que notre système ne change pas de comportement (**stable**), on **augmente progressivement l'intégral ( $I$ )** jusqu'à l'obtention d'une **précision** souhaitée si c'est possible.

Dans notre cas, nous avons obtenu un système **stable** avec une **erreur qui ne dépasse pas 1%** sans l'ajout de l'action  $D$  (Voir chapitre IV figure IV.16 et 17).

### III.9.1. Configuration de la sonde capacitive

La fluctuation du niveau d'eau dans la cuve induit une variation de capacité de la sonde. Cette variation est convertie en une variation d'amplitude de signal. L'information « **amplitude** » est transmise à distance par l'intermédiaire d'une boucle de courant [4 – 20mA]. Nous rencontrons ainsi les conversions successives suivantes :

Niveau —→ Capacité —→ Courant continu.



Figure III.28 : Ensemble cuve et sonde capacitive

La sonde est configurée de tel sorte que :

- ✓ **0%** de niveau correspond à **4mA**.
- ✓ **100%** de niveau correspond à **20mA**.

L'amplitude sous forme de courant [4-20mA] est **transmise** au module d'entrées analogique. LA CPU ne traite des informations que sous forme **numérique**. C'est pourquoi la valeur analogique est **convertie** en un profil binaire. La conversion est effectuée par un CAN (Convertisseur analogique-numérique) intégré au module d'entrées analogiques. Pour les produits SIMATIC, le résultat de cette conversion est toujours mis à disposition de la CPU sous forme d'un **mot à 16 bits**.

### III.9.2. Mise à l'échelle de l'entrée analogique

Pour le traitement ultérieur des valeurs analogiques numérisées, on procède à la « **normalisation** » ou encore « **mise à l'échelle** » des valeurs analogiques.

L'objectif de la mise à l'échelle est de **calculer la valeur réelle du niveau** au lieu des incréments et la comparée à la consigne pour calculer l'erreur (statique ou dynamique).

**L'élaboration** de la mise à l'échelle consiste à la **conversion** de la plage des incréments de [0 à +27648] en **grandeur de niveau** exprimé en pourcentage de [0 à 100%], Autrement dit :

- ✓ L'incrément 0 correspond à 0% de niveau.
- ✓ L'incrément +27648 correspond 100% de niveau.

Pour bien comprendre la notion de la mise à l'échelle, prenons cet exemple :

Si on considère que à l'instant(*t*) **la sonde transmis au module d'entées analogique** un signal d'amplitude qui est égal à **10mA**. Après le traitement de ce signal analogique on considère qu'il correspond à l'incrément **de valeur +10000**.

Pour calculer la valeur réelle du niveau, on utilise la règle de trois comme suite :

$$\begin{array}{l} +27648 \longrightarrow 100\% \\ +10000 \longrightarrow X\% \end{array}$$

La valeur réelle de niveau=  $(1000 \cdot 100) / 27648 = 36.16\%$ .

Pour les produit SIMATIC, la valeur +27648 est utilisée pour la normalisation des valeurs analogique quelle que soit la résolution des module (entrées ou sorties analogique).

Après le traitement du programme dans la CPU (la mise à l'échelle de l'entrée, calcule de l'erreur et la gestion de la régulation) qu'on va voir dans le chapitre VI. Le CNA (convertisseur numérique analogique) intégré au module de sorties analogiques convertit le signal de sortie numérique en valeur de courant [4-20mA].

La valeur résultante du signal de sortie correspond à la grandeur de sortie commandant la vanne modulante.

Chaque amplitude du courant entre [4 et 20mA] correspond à un angle précis d'ouverture de la vanne exprimé en pourcentage de 0 à 100%.

Puisqu'on a élaboré une mise à l'échelle de l'entrée pour la lecture de la valeur réelle du niveau et que la consigne est une valeur réelle. Alors à la fin du traitement du programme on aura une valeur réelle qu'on va convertir en une valeur numérique (incrément) pour qu'elle soit traitée par le module de sorties analogique.

Et pour cela nous avons besoin d'une mise à l'échelle de sortie intégrée dans le programme qui réalisera la conversion de la valeur réelle de la commande en une valeur numérique.

### **III.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une part le principe de fonctionnement de la régulation industrielle ainsi que les correcteurs de base de la régulation PID, à savoir le *PI* et le *PID*. Et d'autre part, la boucle de régulation de niveau de notre système et son principe de fonctionnement ont été profondément discutés, tout en identifiant les moyens matériels et logiciels utilisés.

# *CHAPITRE IV*

## IV.1. Introduction

Pour procéder à la régulation de notre système, nous allons expliquer les différentes étapes à suivre pour la programmation et la supervision de notre installation et nous allons interpréter les résultats de la simulation. Mais avant de procéder à la programmation le choix des composants à utiliser est aussi nécessaire pour procéder à la programmation.

## IV.2. Programmation de l'API

Dans cette partie nous allons décrire les différentes étapes permettant la programmation de l'API pour la mise au point de la boucle de régulation de niveau.

La programmation de l'API est composée de quatre grandes parties :

- La création du projet ;
- La configuration matérielle ;
- La programmation du régulateur et la boucle de régulation ;
- La supervision.

## IV.3. Création du projet

Un projet nous permettra de regrouper l'ensemble des programmes ainsi que les données nécessaires pour réaliser une tâche d'automatisation.

Après un double clic sur l'icône « **Totally Integrated Automation Portal** », on utilise la commande « **créer un projet** » via la vue portail et on écrit le nom du projet dans le champ du texte « **nom du projet** ». Pour notre projet son nom est « **régulation de niveau d'une remplisseuse d'eau minérale (sasib)** ».

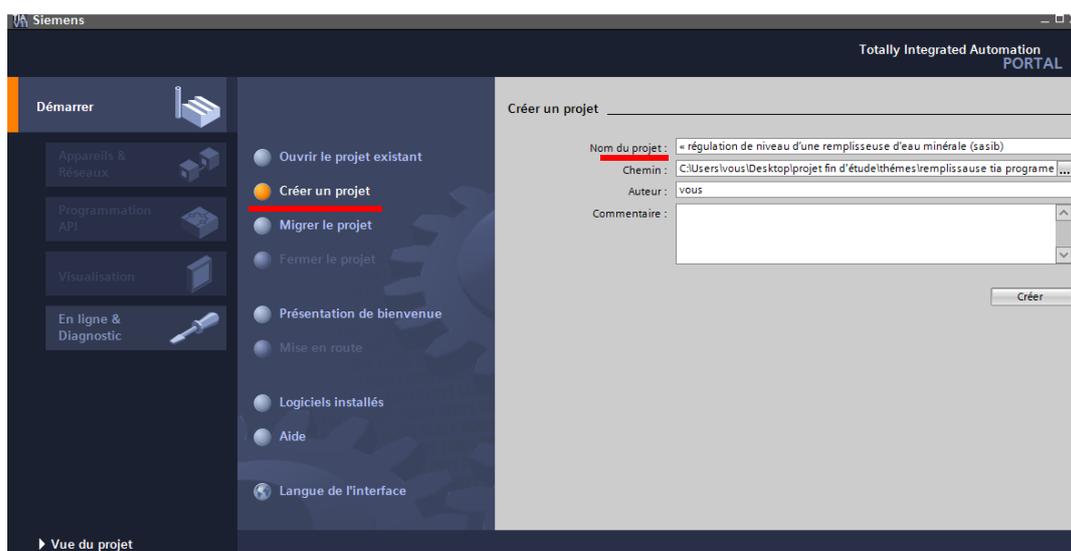


Figure IV.1 : Création d'un projet

## IV.4. Configuration matérielle

C'est une étape importante, qui correspond à l'insertion de la CPU, des modules d'entrées (numériques et analogiques), des modules de sorties (numériques et analogiques) et d'un module d'entrées /sorties numériques.

### IV.4.1. Insertion de la CPU

Dans la zone de texte « **Nom d'appareil** », on va écrire la désignation « **S7-300** », une liste de type des CPU disponible va apparaître et on choisira la CPU « **315 2DP/PN** » version « **3.2** » avec une référence « **6ES7 315-2EH14-0AB0** » et à la fin on clique sur le bouton ajouter, figure (IV.2).

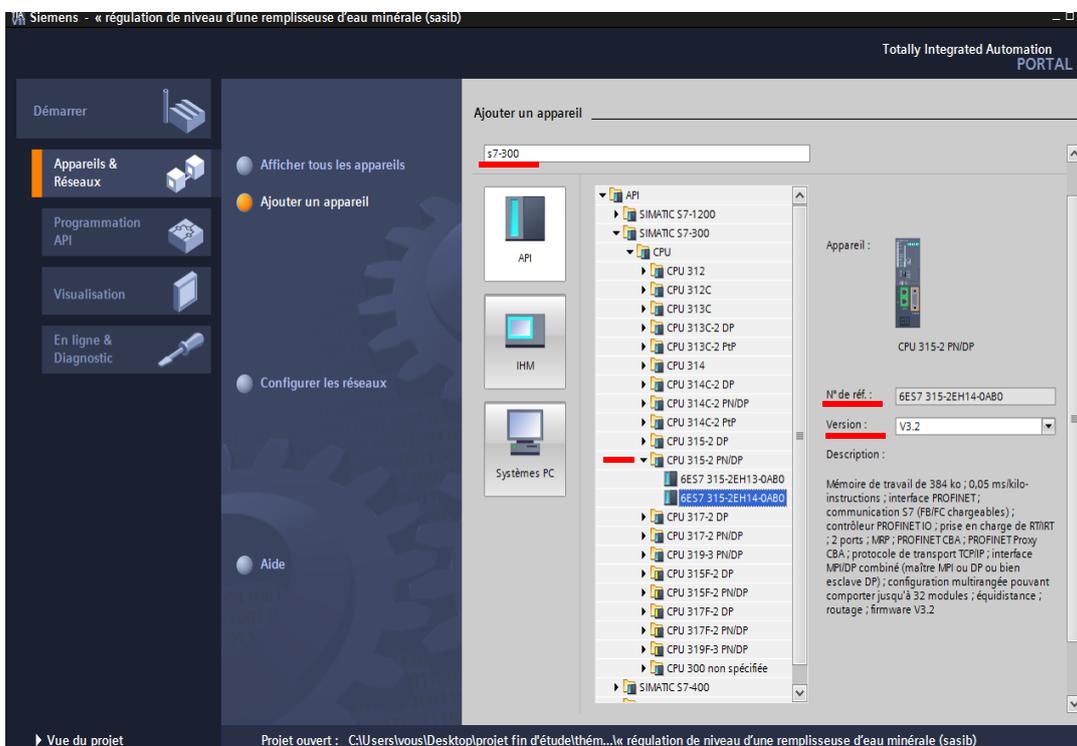


Figure IV.2 : Insertion de la CPU

La CPU que nous avons inséré s'affiche dans la vue des appareils de l'éditeur de matériel et de réseaux, voir figure(IV.3).

La vue des appareils est l'une des trois zones de travail de l'éditeur de matériel et de réseau dans lequel nous avons configuré et paramétré la CPU et les modules.

Après avoir affiché la CPU dans la vue des appareils l'étape suivante est l'insertion d'un **module de communication Ethernet pour l'IHM** (interface homme machine).

Pour insérer ce module on développe le catalogue du matériel en cliquant sur l'icône « **catalogue** », dans le catalogue apparaît une icône « **modules de communication** » on clique

dessous et on choisit le module qui nous convient et on le glisse à l'emplacement « 4 », voir figure (IV.3).

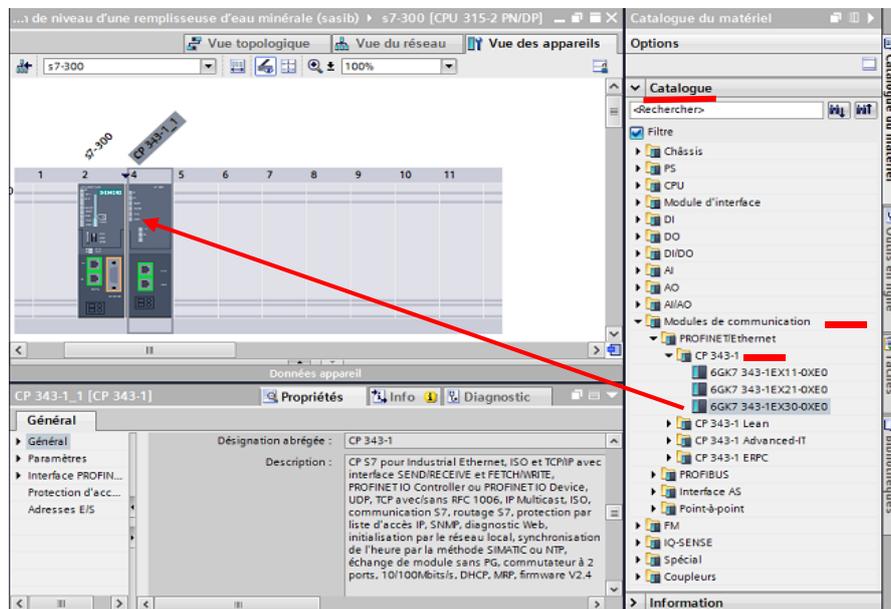


Figure IV.3 : Ajout du module de communication

#### IV.4.2. Insertion de l'alimentation

L'alimentation « PS » fournit l'alimentation aux modules d'entrées/sorties pour le traitement des signaux entrants et sortants dans la CPU.

Pour insérer la « PS » on clique sur l'icône « PS » dans le catalogue et on choisit celle qui nous convient pour la ramener à l'emplacement « 1 ».

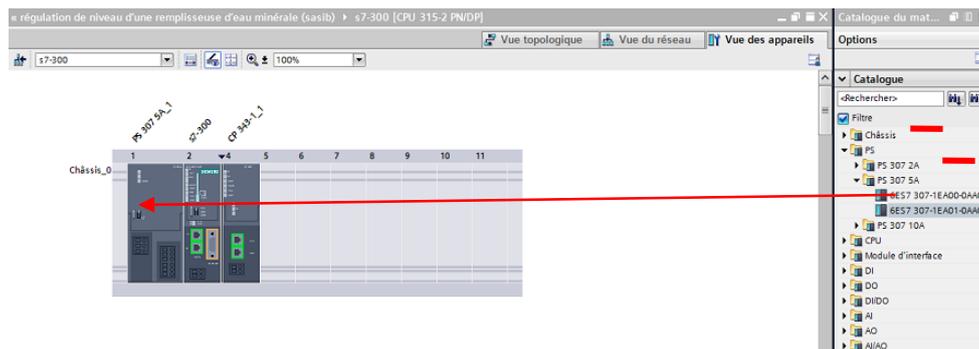


Figure IV.4 : Insertion de l'alimentation « PS »

#### IV.4.3. Insertion des modules entrées/sorties TOR

Pour insérer un module d'entrées ou sorties TOR, dans le catalogue on clique sur l'icône « DI » pour un module d'entrées et sur l'icône « DO » pour un module de sorties, et sur l'icône « DI/DO » pour un module entrées/sorties.

Les modules « TOR » que nous avons utilisé sont :

- DI 32×DC 24V/0.5A « 6ES7 321-1BL00-0AA0 » (deux module).
- DO 32×DC 24V/0.5A « 6ES7 322-1BL00-0AA0 » (deux module).
- DI16/DO16×DC 24V/0.5A « 6ES7 323-1BL00-0AA0 ».

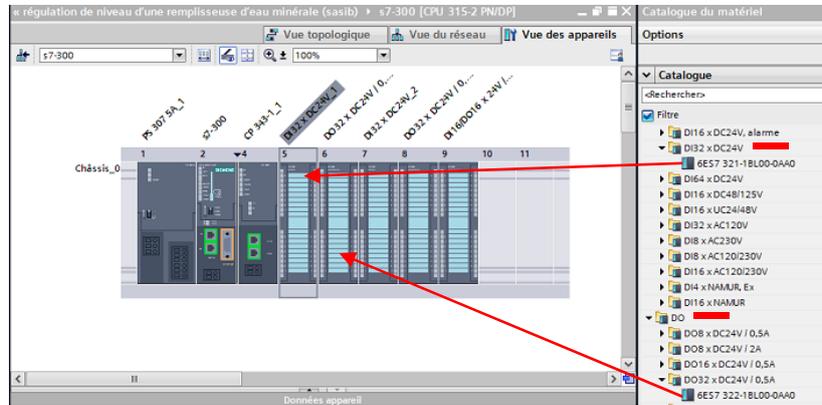


Figure IV.5 : Insertion des modules TOR

#### IV.4.4. Identification des adresses des modules entrées/sortie TOR

Les adresses d’entrée/sortie peuvent être visualisées. Dans notre cas, les modules qui disposent chacun de 32 entrées ou sorties numériques requièrent une plage d'adresses respective de 32 bits. Chaque emplacement est cependant automatiquement affecté à une plage d'adresses d'un octet qui comporte 8bits. Le module qui dispose de 16 entrées /sorties et requière une plage d’adresses respective de 16 bits qui occupent 2 octet.

Les adresses des modules TOR sont réparties comme suite :

Tableau IV.1 : Les adresses des modules TOR

MODULES	ADRESSES DEBUT	ADRESSES FIN
DI 32×DC24V/0.5A (emplacement 5)	I4.0	I7.7
DO 32×DC 24V/0.5A (emplacement 6)	Q8.0	Q11.7
DI 32×DC 24V/0.5A (emplacement 7)	I12.0	I15.7
DO 32×DC 24V/0.5A (emplacement 8)	Q16.0	Q19.7
DI16/DO16×DC 24V/0.5A(emplacement 9)	IQ.20	IQ.21

Les adresses d’entrée/sortie ou la plage d’adresses peuvent être modifiés dans la fenêtre d’inspection sous « propriétés adresses » (vue des appareils), voir figure (IV.6).

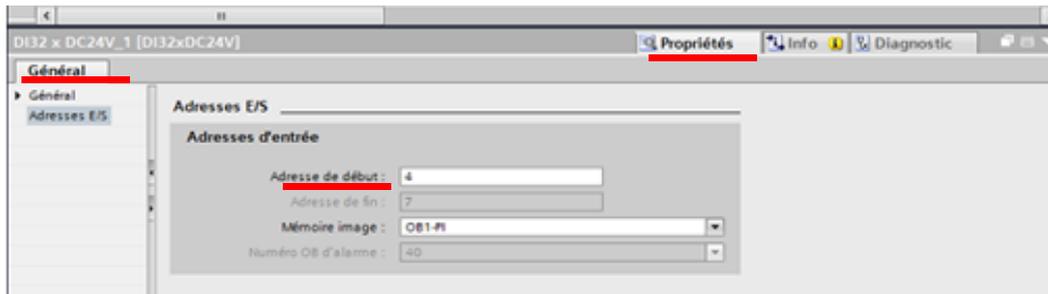


Figure IV.6 : Propriétés adresses

#### IV.4.5. Insertion des modules sortie/ entrée analogique

Pour insérer un module de sortie ou d'entrée analogique, dans le catalogue en clique sur l'icône « AO » pour le module de sortie et « AI » pour celui de l'entrée et on choisit le type de module qui nous convient.

Le module de sortie analogique que nous avons utilisé est : « **DO4×12BITS**« **6ES7 332-5HD01-0AB0** », et celui de l'entrée est : « **DI8×12BITS 6ES7 331-7KF02-0AB0** ».

Après la sélection de ces modules on les fait glisser sur les emplacements « 10 » et « 11 » respectivement.

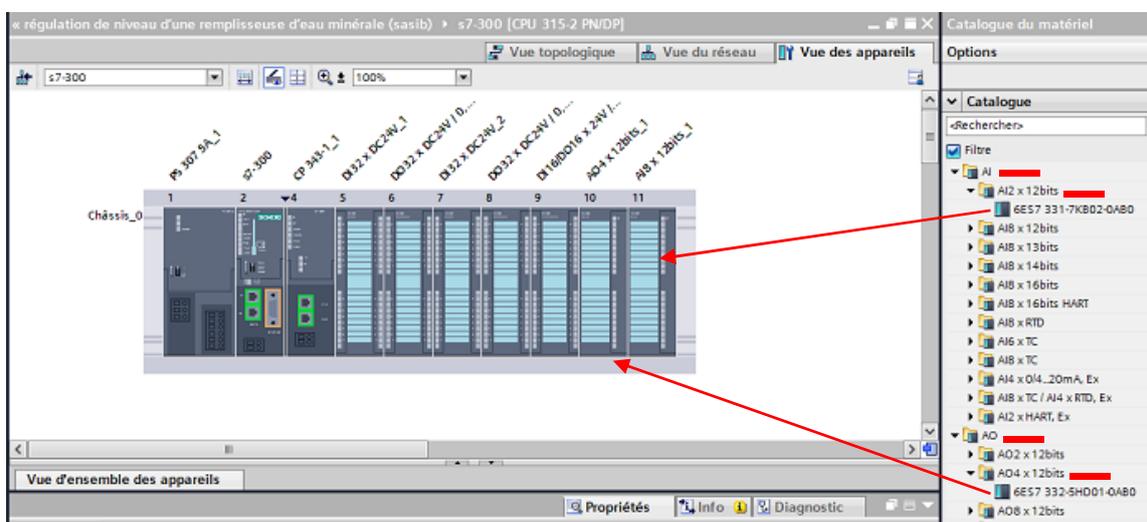


Figure IV.7 : Insertion des modules sortie/ entrée analogique

#### IV.4.6. Configuration de type de sorties/entrées analogique

##### 🔧 Configuration de sorties analogique :

Nous avons utilisé des sorties de « **4...20mA** ». Il existe plusieurs types de sorties analogiques, on retrouve :

- La sortie en tension avec des plages de variation suivantes :

[1...5V],[0...10V] et  $\pm 10V$ .

- La sortie en courant avec des plages de variation suivantes :

[0...20mA], [4...20mA] et  $\pm 20mA$ .

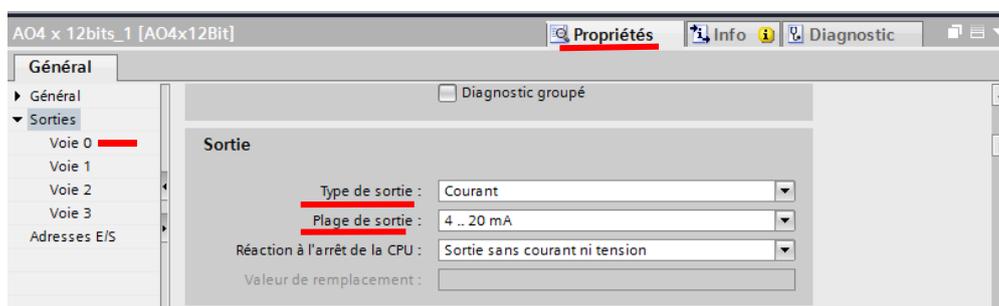
Après le clic sur le module dans l'emplacement « **10** », les sorties analogique [**4...20mA**] sont configurées dans la fenêtre d'inspection sous « sortie » par la sélection des voies en entrant dans la zone du texte « type de sortie » (courant) et dans la zone du texte « plage de sorties » (**4..20mA**), voir figure(IV.8).

Le module dispose de 4 voies (sorties) et sollicite une plage d'adresse respective de 64 bits. Chaque sortie est cependant automatiquement affectée à une plage d'adresses de deux octets qui comportent 16 bits.

Les adresses de sorties sont réparties comme suite :

**Tableau IV.2** : Les adresses de sorties analogique

Voie	Adresse(Q)
Voie 1	352-353
Voie 2	354-355
Voie 3	356-357
Voie 4	358-359



**Figure IV.8** : Configuration de type de sorties analogique

#### **Configuration d'entrées analogique :**

Les entrées utilisées est de type « **4...20mA** », pour réaliser cette configuration on suit les même étapes de la configuration des sorties, voir figure (IV.11).

Dans le cas de l'entrée lorsqu'on choisit le type de mesure qui est dans notre cas le « **courant** » on doit aussi choisir le type du capteur soit à deux fils soit à quatre fils.

Nous avons choisit «**Courant transducteur de mesure 2 fils** » car la sonde que nous avons utilisé comporte de fils.

Le module dispose de 8 voies (entrées) et requiert une plage d'adresses respectives de 128 bits. Chaque entrée est cependant automatiquement affectée à une plage d'adresses de deux octets qui comportent 16 bits.

Les adresses des entrées sont réparties comme suite :

**Tableau IV.3 : Les adresses d'entrées analogiques**

Voie	adresses début (I)	adresses fin(I)
voie 0-1	368	371
voie 2-3	372	375
voie 4-5	376	379
voie 6-7	380	383

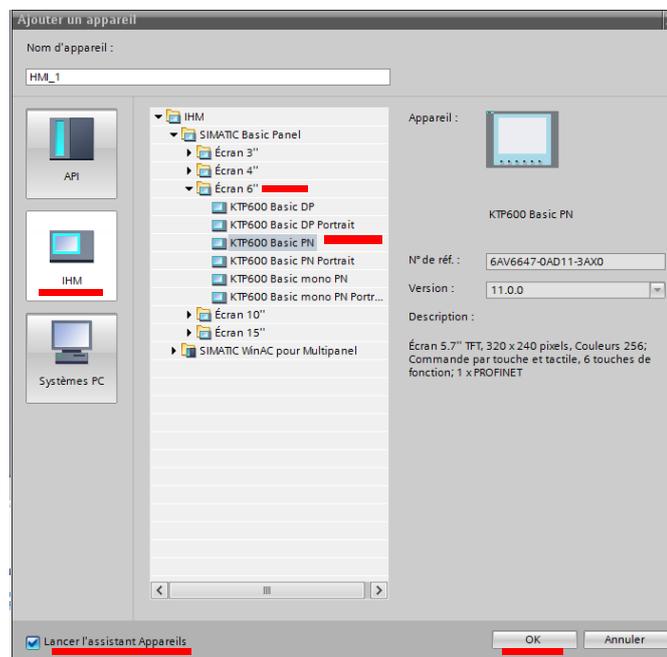
#### IV.4.7. Ajout de l'IHM

La création de l'IHM se fait comme suit :

Pour commencer, un double-clic dans la navigation du projet sur « **Ajouter un appareil** ».

Dans la boîte de dialogue « **Ajouter un appareil** » on va effectuer les paramétrages suivants :

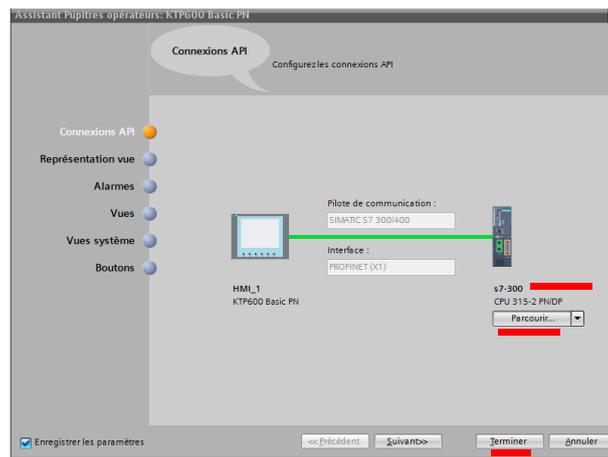
- Cliquer sur « **IHM** ».
- Sélectionner « **SIMATIC basic panel** ».
- Sélectionner « **écran 6** » et puis on sélectionne « **KTP600 Basic PN** ».
- Vérifier si la fonction « **Lancer l'assistant Appareils** » est activée et confirmer la création de l'IHM avec « **OK** ».



**Figure IV.9 : Ajout de l'IHM**

Lorsqu'on clique sur « **OK** » la boîte de dialogue « **Assistant Pupitres opérateurs** » s'ouvre pour établir une connexion entre la CPU et l'IHM. Pour établir la connexion on procède comme suit:

- cliquer sur le bouton « **Parcourir** ».
- sélectionner la CPU « **S7-300** ».
- Cliquer sur le bouton « **terminer** ».



**Figure IV.10** : Connexion de l'IHM avec la CPU

## IV.5. Programmation des blocs de notre système

Avant de commencer la programmation, la première étape consiste à la déclaration de nos variables (nom symbolique, adresse, type de données) dans « **la table de variable API** ».

Notre programme se compose d'un bloc d'organisation **OB1**, un bloc d'alarme cyclique **OB35**, de fonctions **FC**, de blocs de données globales **DB**.

La définition de l'ensemble nom symbolique, type de données, bloc de programme se trouve dans **l'annexe 1**.

La table de variable API et les blocs de données utilisés se trouvent dans **l'annexe 2**.

### IV.5.1. Création d'un bloc ou d'une fonction

Pour créer un bloc ou une fonction on sélectionne dans le navigateur du projet « **S7-300[CPU315-2PN/DP]** » puis « **blocs de programme** » puis « **Ajouter nouveau bloc** ».

Dans la fenêtre « **ajouter un bloc** » on donne le nom et le langage de programmation au bloc choisit.

Le langage de programmation que nous avons utilisé est « **langage à contacte** ».

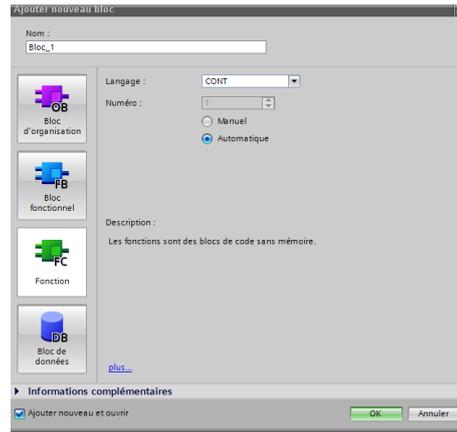


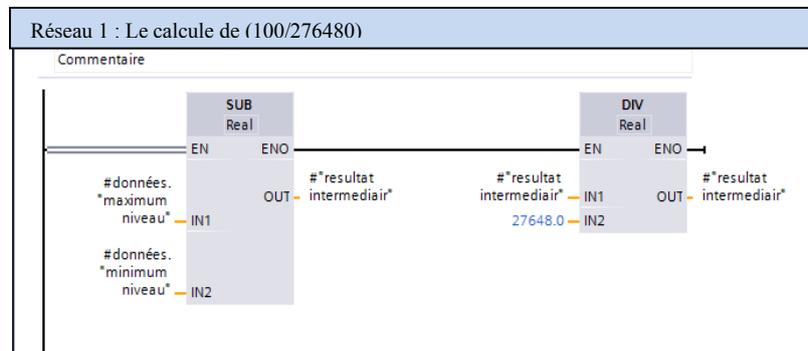
Figure IV.11 : Choix des blocs de programmation

### IV.5.2. Création de la fonction de mise à l'échelle d'entrée

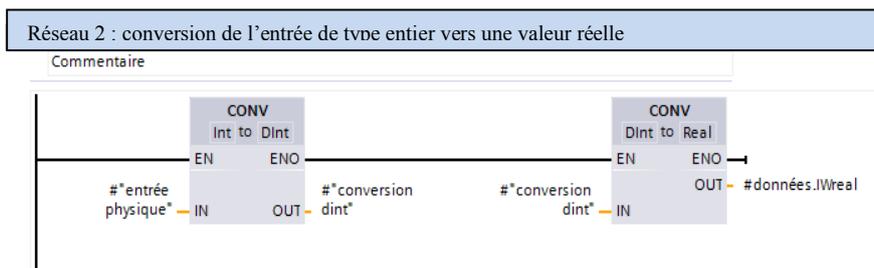
#### La fonction FC1 :

Nous avons créé cette fonction afin de lire la valeur réelle de niveau, comme on l'a déjà expliqué à la fin du chapitre 3, les paramètres transmis au **FC1** ainsi que les variables statiques sont sauvegardés dans le bloc de données d'instance **DB1** qui lui est attribué, voir (annexe2).

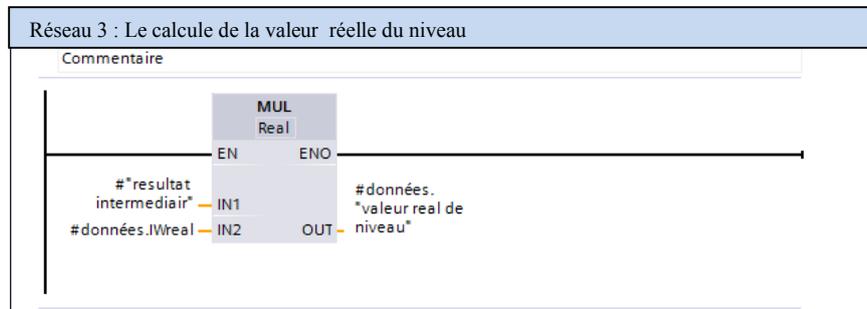
La fonction FC1 est composée de trois réseaux :



Dans ce réseau nous avons utilisé deux fonctions mathématiques la première fonction c'est « **SUB** » pour calculer la différence (100-0) et la deuxième c'est « **DIV** » pour diviser (100-0) sur 276480.



Nous avons utilisé deux fonction de conversion la première pour convertir l'entrée physique de type «entier» de 16 bits vers « double entier » de 32 bits, et la deuxième pour la conversion de la valeur double entier obtenue vers une valeur réelle de 32 bits.

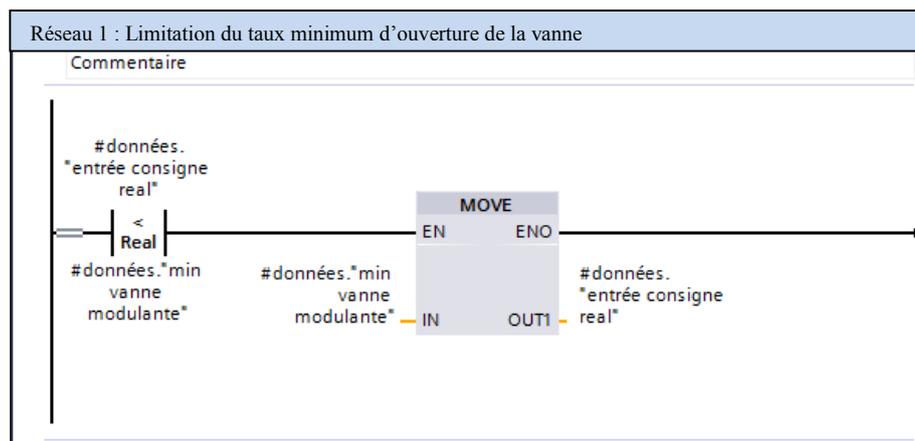


Le réseau trois a pour objectif de calculer la valeur réelle du niveau en utilisant une fonction de multiplication entre le résultat du premier réseau et le deuxième pour avoir enfin la valeur réelle du niveau sous forme d'un pourcentage.

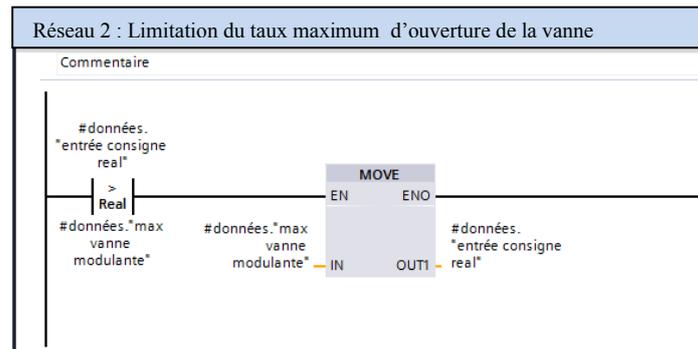
#### IV.5.3. Création de la fonction de mise à l'échelle de sortie

##### 🚧 La fonction FC2 :

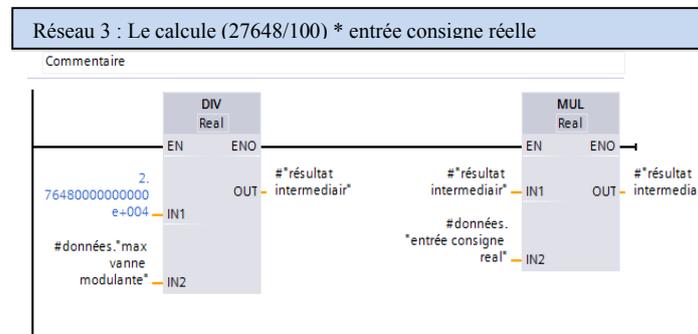
Nous avons créé cette fonction afin de lire la valeur de commande de la vanne comme nous l'avons déjà expliqué à la fin du chapitre 3, les paramètres transmis au FC2 ainsi que les variables statiques sont sauvegardés dans le bloc de données d'instance DB2 qui lui est attribué, voir (annexe2), la fonction FC2 est composée de cinq réseaux :



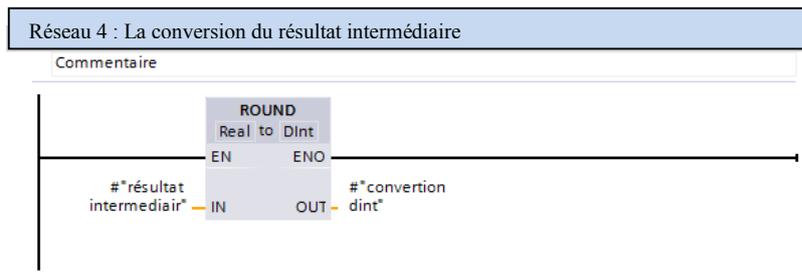
Pour la limitation du paramètre bas de la vanne qui correspond à 0% d'ouverture (vanne fermée), on fait une comparaison entre « entrée consigne réelle » et « min vanne modulante (0%) ». Si l'entrée consigne réelle est inférieure à 0% alors la fonction « move » a pour rôle d'écraser la valeur de la consigne et de la remplacer par 0%.



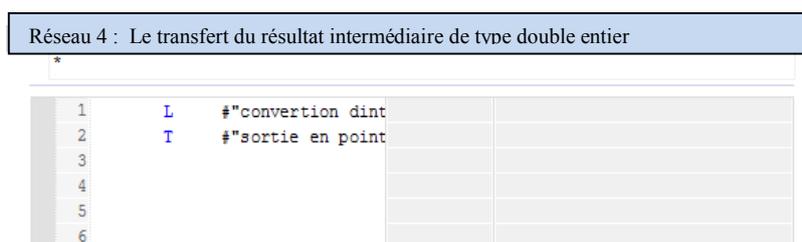
Pour la limitation du paramètre haut de la vanne qui correspond à 100% d'ouverture, on fait une comparaison entre « **entrée consigne réelle** » et « **max vanne modulante (100%)** ». Si l'entrée consigne réelle est supérieure à 100% alors la fonction « **move** » a pour rôle d'écraser la valeur de la consigne et de la remplacer par 100%.



Dans ce réseau la fonction « **DIV** » a pour rôle de diviser (27648 sur 100) et la deuxième « **MUL** » pour multiplier le résultat de la fonction « **DIV** » par « **entrée consigne réelle** ».



La fonction « **ROUND** » a pour rôle de convertir le résultat du réseau 3 d'une valeur réelle de 32 bit à une valeur double entier de 32 bits.

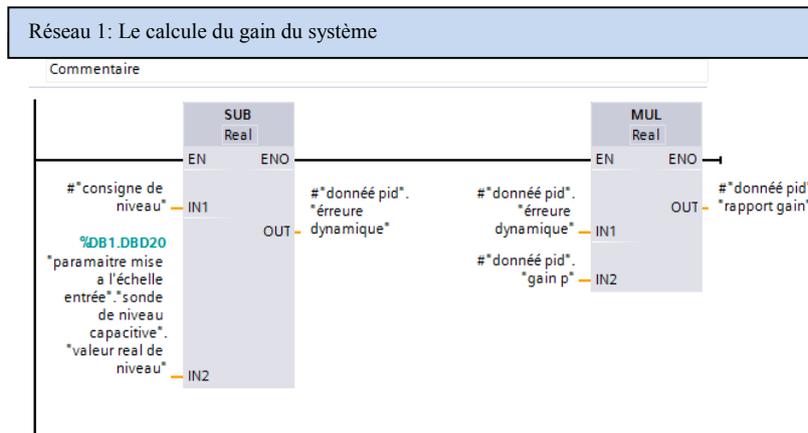


Dans le réseau 5, nous avons utilisé le langage de programmation « LIST » pour lire « conversion dint » et la transférer à « sortie en point ».

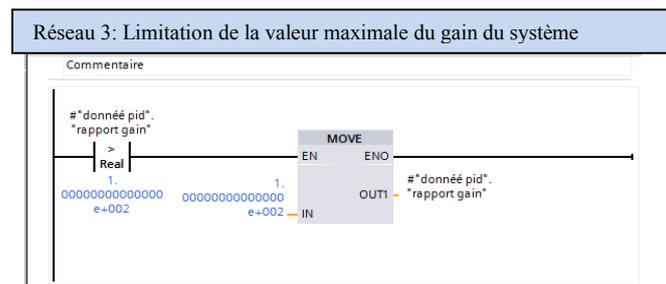
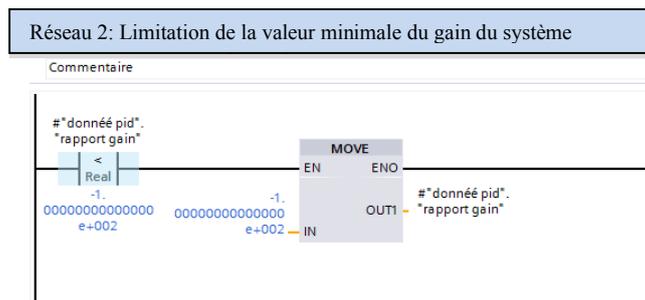
#### IV.5.4. Création du régulateur PI doux et agressif

##### La fonction FC3 :

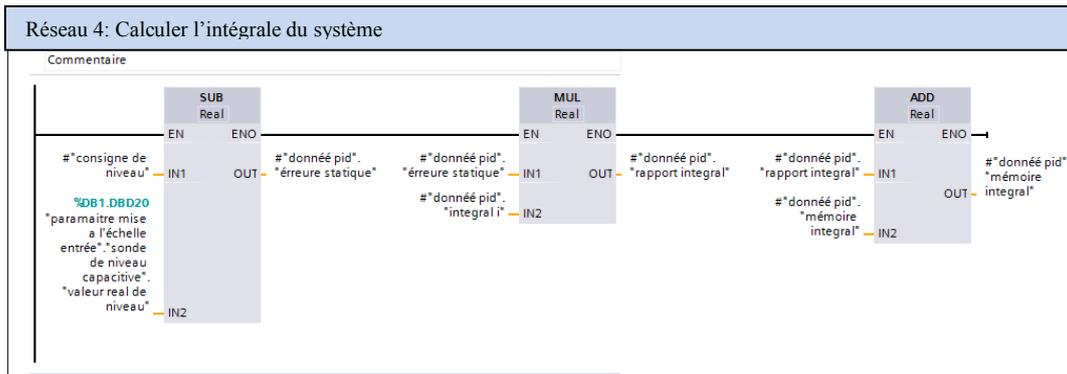
Elle contient l’algorithme du régulateur PI qui est l’équivalence d’un régulateur PI électronique, les paramètres transmis au FC3 ainsi que les variables statiques sont sauvegardés dans le bloc de données d’instance DB3 qui contient les paramètres des deux régulateurs, voir (annexe 2), la fonction FC3 est composée de huit réseaux :



Dans ce réseau on a utilisé la fonction « SUB » pour calculer l’erreur dynamique de notre système qui est égale à la consigne moins la valeur réelle du niveau ensuite on a utilisé la fonction « MUL » pour avoir la multiplication de l’erreur dynamique avec la valeur du gain p, le résultat obtenu est **le gain de notre système**.



Nous avons créé les réseaux 2 et 3 pour la limitation du gain de notre système.



Après le calcul de l'erreur statique (fonction « **SUB** ») et la multiplication avec la valeur de l'intégrale I (fonction « **MUL** »).

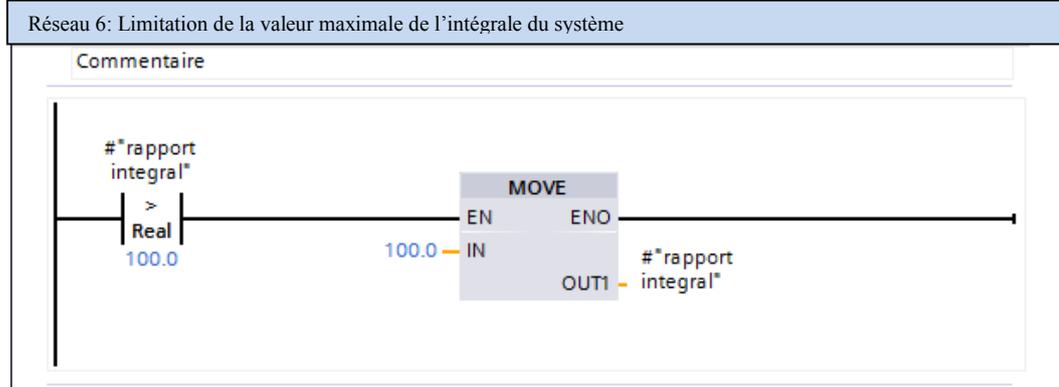
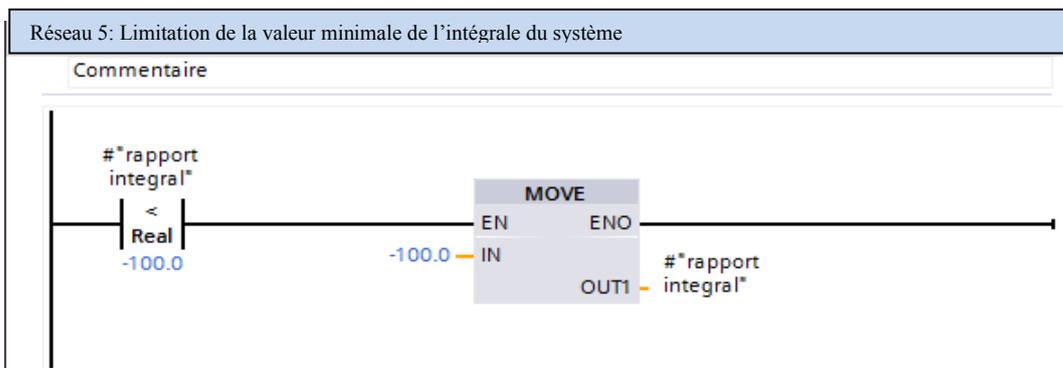
Le résultat obtenu de cette multiplication « **rapport intégral** » est additionné avec « **mémoire intégral** » (fonction « **ADD** ») pour avoir à la fin l'intégrale de notre système.

L'algorithme de l'intégrale de notre système fonctionne comme suit :

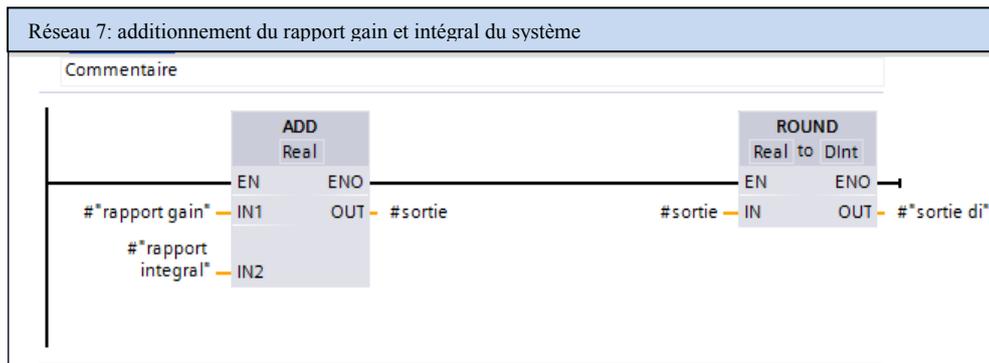
Si on considère à l'instant (t), le rapport intégrale = X et qu'à l'instant (t-N) la mémoire intégrale = Y. Alors l'intégral de notre système sera égale à (X+Y).

Avec : (X et Y) sont des valeurs réelles.

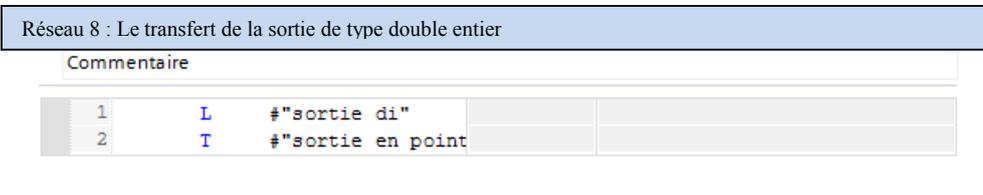
N est un intervalle de temps de **100ms** pour le quel le rapport intégrale est mémorisé d'où l'utilisation du bloc du programme **OB35** pour réaliser la **mémoire intégrale**.



Les réseaux 5 et 6 ont pour objectif, la limitation de l'intégral du système.



Nous avons additionné le rapport gain et intégrale en utilisant la fonction « **ADD** » pour avoir un régulateur PI et de convertir le résultat de l'addition d'une valeur réelle à une valeur double entier.

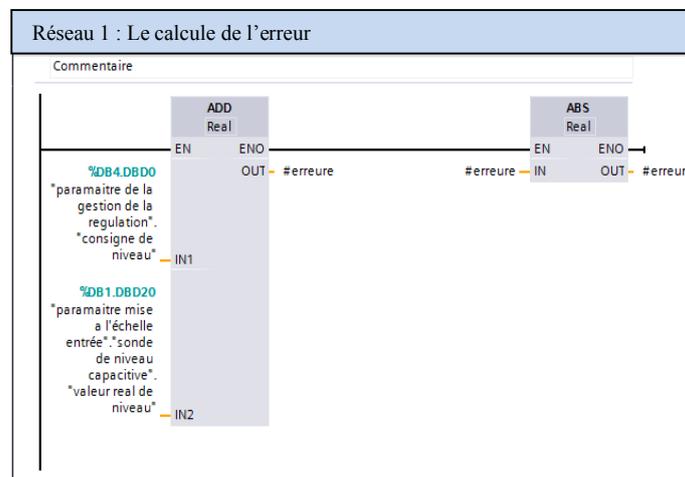


Dans le réseau 8, nous avons utilisé le langage de programmation « **LIST** » pour lire « sortie di » et la transférer à « sortie en point ».

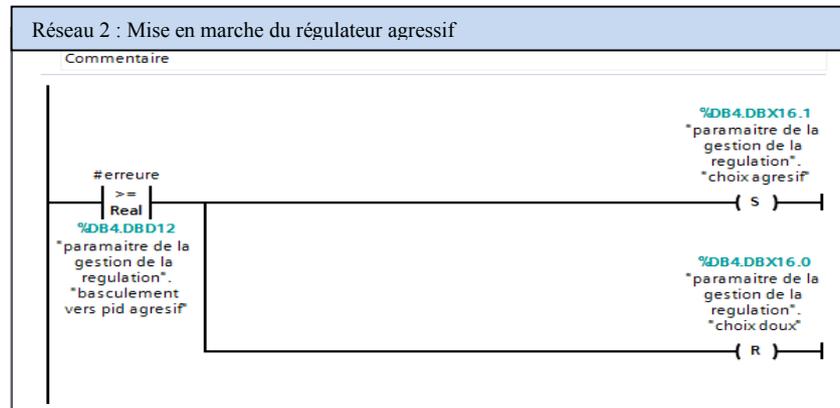
### IV.5.5. La gestion des régulateurs doux et agressif

#### La fonction FC4 :

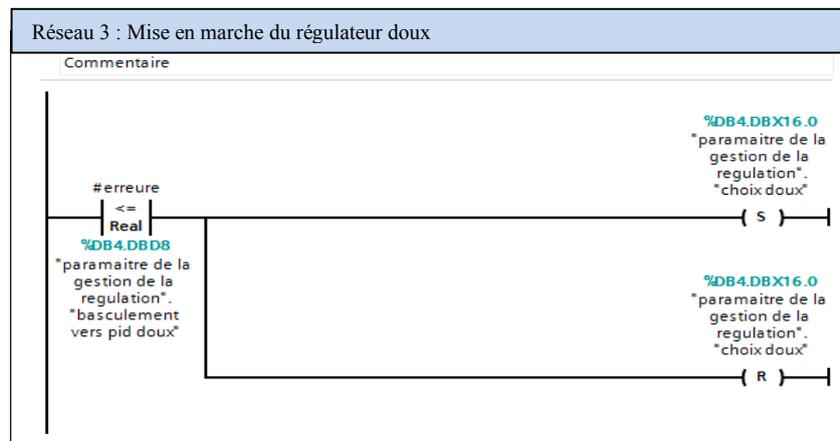
Cette fonction a pour objectif de sélectionner le régulateur qui doit être en mode marche selon la valeur de l'erreur comme on l'a déjà expliqué à la fin du chapitre 3. Les paramètres transmis au FC4 ainsi que les variables statiques sont sauvegardés dans le bloc de données d'instance DB4, voir annexe 2.



Le premier réseau consiste à calculer l'erreur avec la fonction « **ADD** » et lire sa valeur absolue en utilisant la fonction « **ABS** » pour qu'elle soit exploitée à la sélection du régulateur qui sera en mode marche.



Dans ce réseau, l'erreur est comparée à la condition pour laquelle le régulateur agressif soit en mode marche, si l'erreur est supérieure ou égale à cette condition « **10%** », voir (annexe 2 DB4), le régulateur agressif sera sélectionné par la fonction « **(S)** » et le régulateur doux sera arrêté par la fonction « **(R)** ».

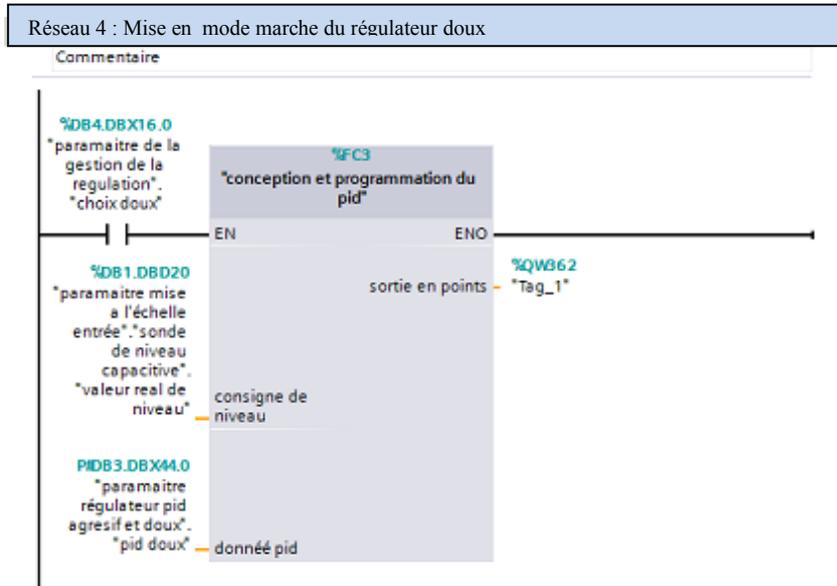


Dans ce réseau, l'erreur est comparée à la condition pour laquelle le régulateur doux soit en mode marche, si l'erreur est inférieure ou égale à cette condition « **5%** », voir (annexe 2 DB4), le régulateur doux sera sélectionné par la fonction « **(S)** » et le régulateur agressif sera arrêté par la fonction « **(R)** ».

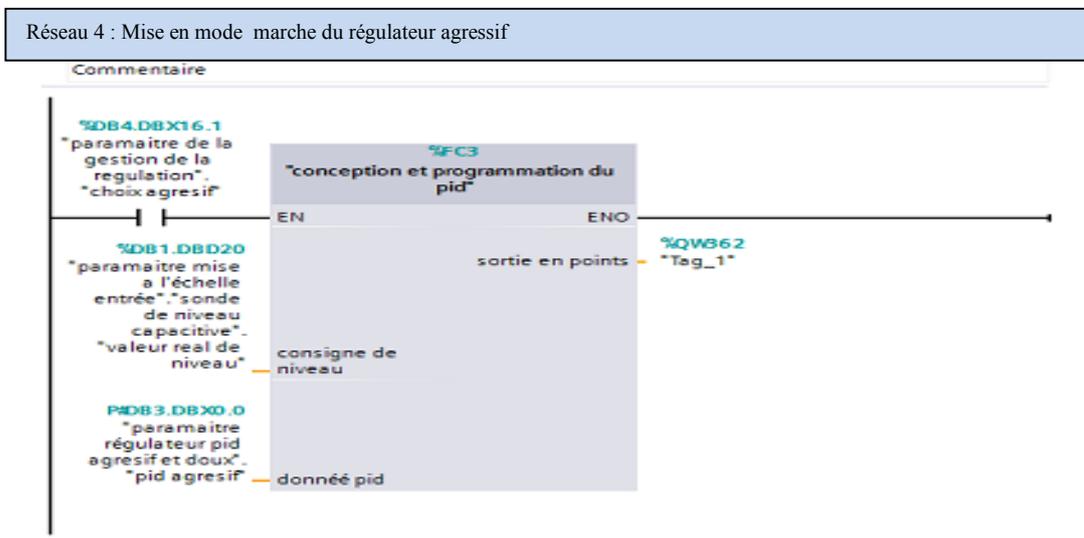
Pour bien comprendre le déroulement des réseaux 2 et 3 prenons cet exemple :

- Si l'erreur est supérieure ou égale à 10% le régulateur agressif sera en mode marche, et si elle est inférieure à 10% et supérieure à 5% le régulateur agressif sera toujours en mode marche.

- Si l'erreur est inférieure ou égale à 5% le régulateur doux sera on mode marche, et si elle est supérieure à 5% et inférieure à 10% le régulateur doux sera toujours en mode marche. Autrement dit entre 5% et 10% le régulateur qui sera en mode marche c'est celui qui l'est déjà avant que l'erreur soit entre 5% et 10%.



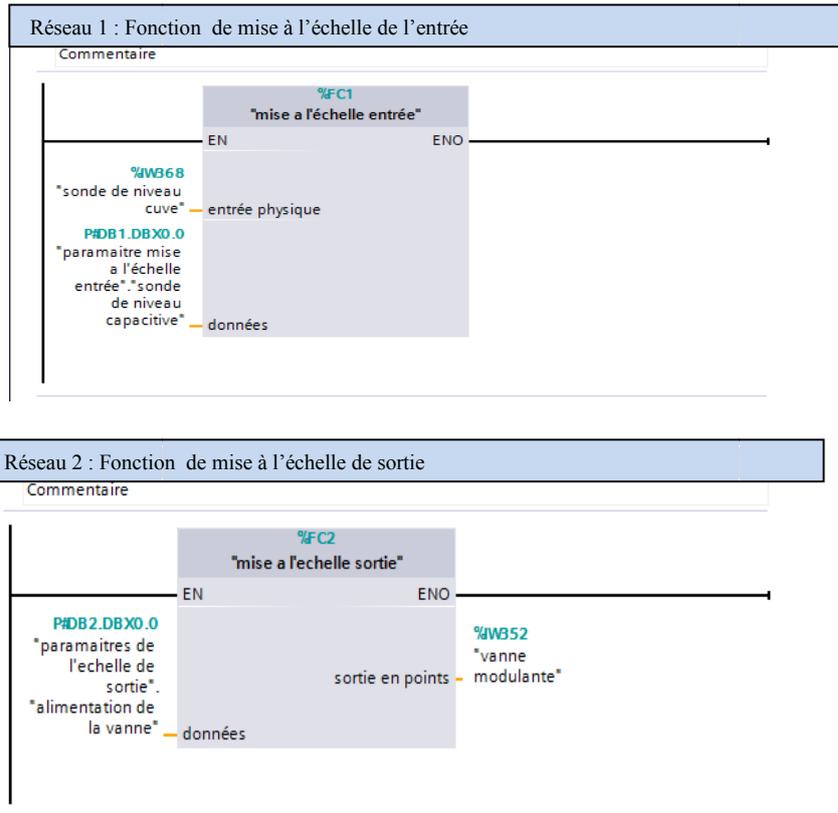
Si la condition de mise en marche de l'un des régulateurs est activée on fait appel à la fonction FC3 avec les paramètres du régulateur doux.



Si la condition de la mise en marche du régulateur est activée on fait appel à la fonction FC3 avec les paramètres du régulateur agressif.

La fonction FC4 est appelée dans le bloc d'alarme cyclique OB35.

Le bloc OB1 regroupe toutes les instructions que le programme va exécuter d'une manière cyclique, il fait appel à toutes les fonctions (FC1 et FC2) et au bloc OB35 :



## IV.6. Supervision

Dans ce qui suit, on présentera les différentes fenêtres des interfaces créées servant de pupitre opérateur pour la supervision et le contrôle de la régulation.

La table des variables utilisées dans l'IHM est insérée dans l'annexe 2.

### IV.6.1. Vues de l'IHM de la régulation

Les vues de l'IHM concernant la régulation sont les suivantes :

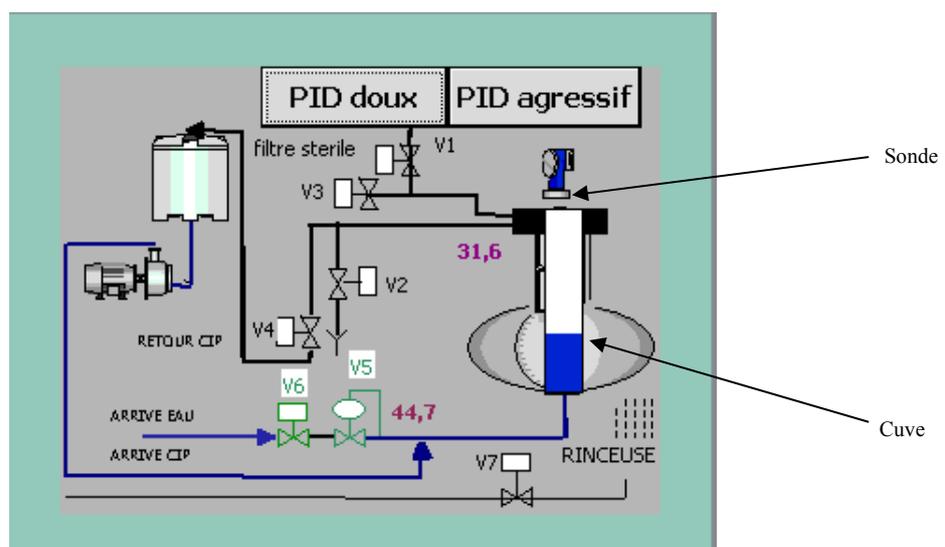


Figure IV.12 : Vue racine

Lors de l'arrivée de l'eau par la vanne (v6) qui est de type TOR utilisée pour la sécurité (isolation et limitation du dépassement), l'eau va continuer de s'écouler à travers la vanne modulante (v5) pour atteindre la cuve à l'intérieur de laquelle se trouve la sonde.

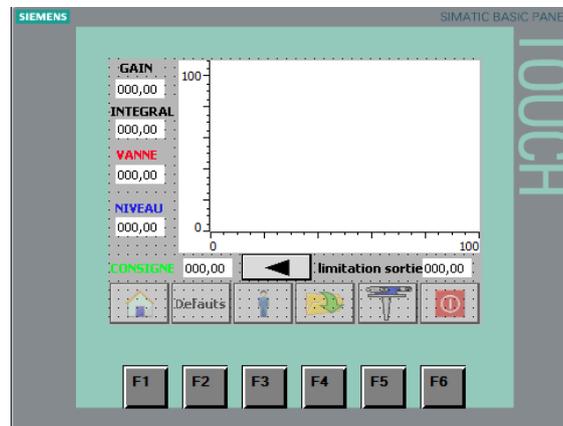


Figure IV.13 : Visualisation du comportement de notre système

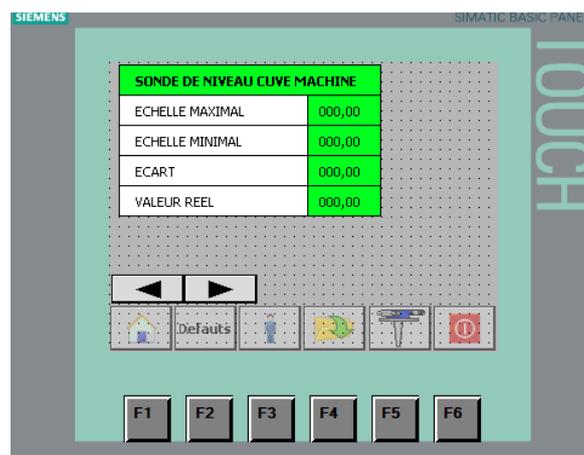


Figure IV.14 : Paramètres de la sonde

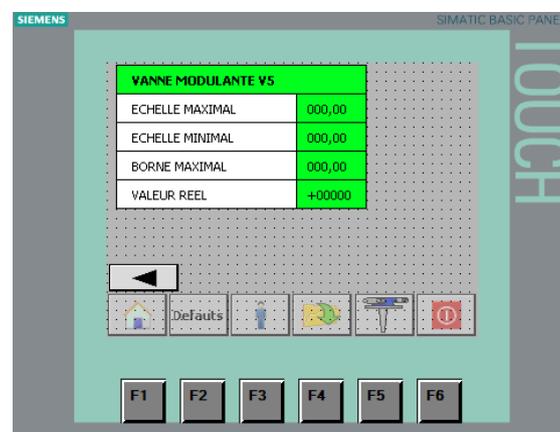
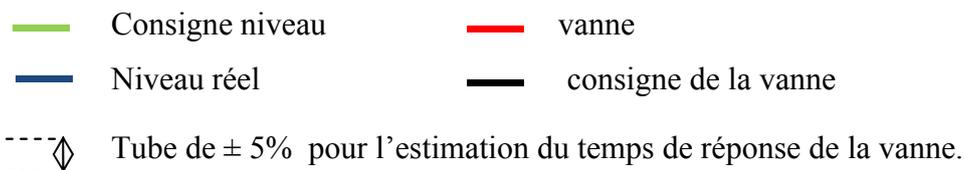


Figure IV.15 : Paramètres de la vanne modulante

## IV.7. Interprétation du comportement de notre système

Pour mettre en évidence l'influence de l'ensemble (régulateur doux, agressif et le gain, d'intégrale) sur le comportement de notre système (niveau, vanne modulante), on a effectué une simulation en temps réel en modifiant les paramètres (P, I et la consigne).

### IV.7.1. Diagramme fonctionnel pour la lecture des courbes



$t_{rn}$ : Temps de réponse (courbe de niveau).

$t_{rv}$ : Temps de réponse (courbe de la vanne).

$t_{mv}$ : Temps de monté (courbe de la vanne).

- La lecture des courbes se fait de la **droite** vers la **gauche**.
- L'axe de temps c'est celui des abscisses, il est exprimé en pourcentage.
- De 0% à 100% axe de temps correspond à un temps de **90s** (utilisation d'un chronomètre pour trouver cette correspondance).
- Les paramètres du régulateur doux sont : (**P=3, I=0.02**), voir (annexe 2 DB3).
- Les paramètres du régulateur agressif sont : (**P=5, I=1**), voir (annexe 2 DB3).
- Chaque graduation dans les deux axes correspond à 5%.
- La valeur affichée sur l'écran (vanne, niveau) correspond au point d'intersection de la courbe (vanne, niveau) avec l'axe des coordonnées.
- La consigne de niveau est de 32% et la cuve a une capacité de 80L (100%), en utilisant la règle de trois on trouvera que 32% de niveau correspond à une capacité de 25,6L.
- Le calcul du temps de réponse ( $t_r$ ) et le temps de monté ( $t_m$ ) :

Pour le calcul de ( $t_r$ ) ou ( $t_m$ ) on procède comme suit :

Si par exemple ( $t_r$ ) ou ( $t_m$ ) correspond à une abscisse de valeur 20% (axe de temps), puisque la lecture de la courbe est de droite vers la gauche, on calcule dans le premier temps la différence (100%-20%) qui est égale à 80% et après on va utiliser la règle de trois comme suit :

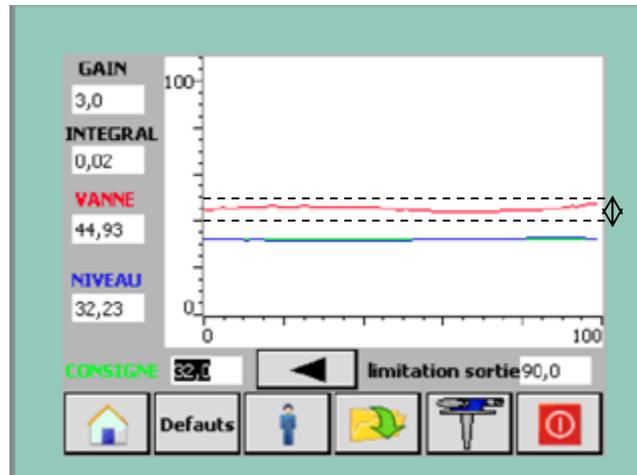
100%  $\longrightarrow$  90s

80%  $\longrightarrow$  ( $t_r$ ) ou ( $t_m$ )

Donc ( $t_r$ ) ou ( $t_m$ ) sera égale à  $\frac{(80 * 90)}{100} = 72s$ .

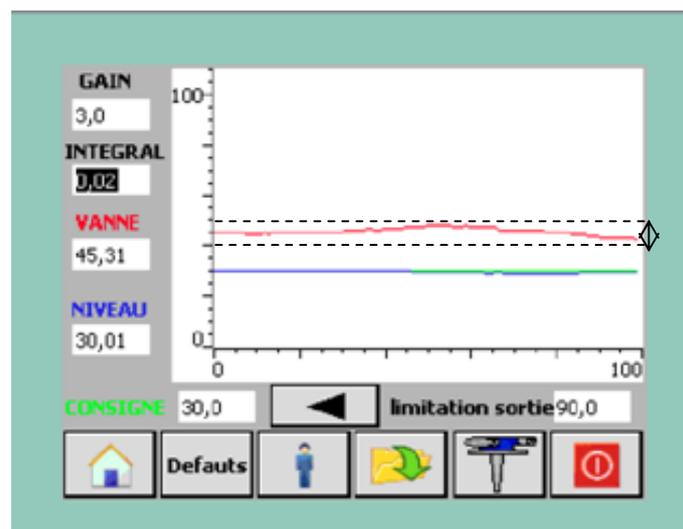
### IV.7.2. présentation des résultats obtenus

Les figures suivantes présentent le comportement de notre système en temps réel :



**Figure IV.16 :** Comportement de notre système au régime permanent

- On voit bien que pour une consigne de niveau de 32%, le niveau réel est de 32.23%. Donc l'erreur au régime permanent ne dépasse pas **1%** se qui veut dire que **notre premier objectif est atteint**.
- Le comportement de la vanne **converge** vers une valeur finie qui est presque égale à **45%** avec des petites variations qui ne dépassent pas **5%** et **sans oscillation**, cela signifie que la vanne a un **comportement stable, donc nous avons aussi atteint le deuxième objectif**.

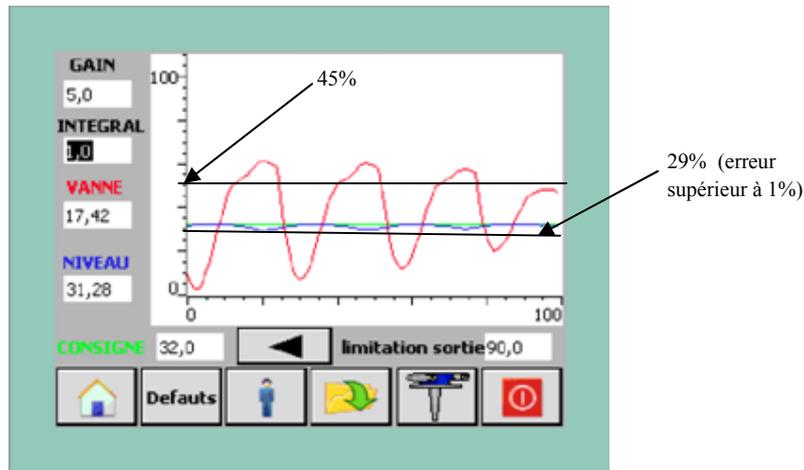


**Figure IV.17 :** Comportement de notre système avec le régulateur doux

- On voit bien que pour une consigne de niveau de 30% le niveau réel est de 30.01%.

Donc l'erreur au régime permanent est de **0.01%**. Pour le comportement de la vanne on constate la même chose que pour la figure (IV.16).

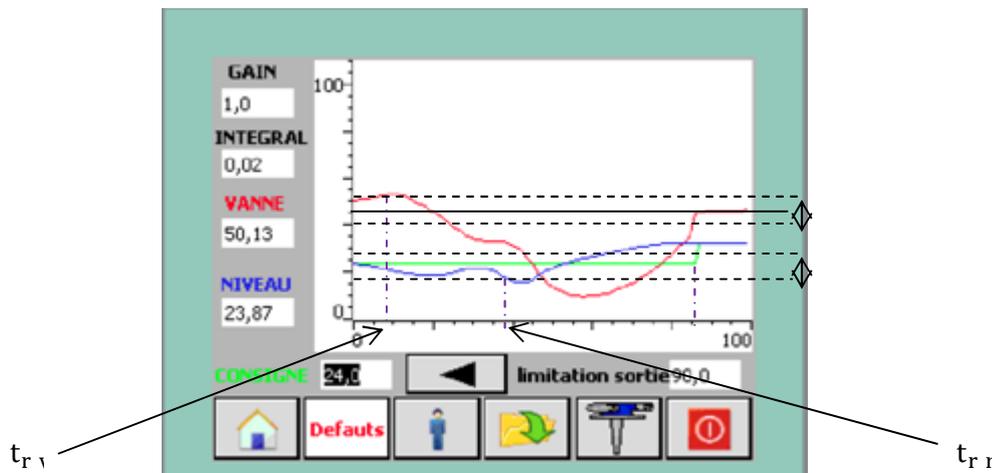
- D'après les deux figures (IV.16 et 17) on constate que pour atteindre une erreur inférieure à 1%, dans les deux cas le taux d'ouverture de la vanne est très proche de 45%. A cet effet on considéra que la **consigne de la vanne est égale à 45%**.



**Figure IV.18** : Comportement du système avec le régulateur agressif

Cette figure illustre clairement l'**effet déstabilisant** du régulateur agressif sur le comportement de la vanne au régime permanent.

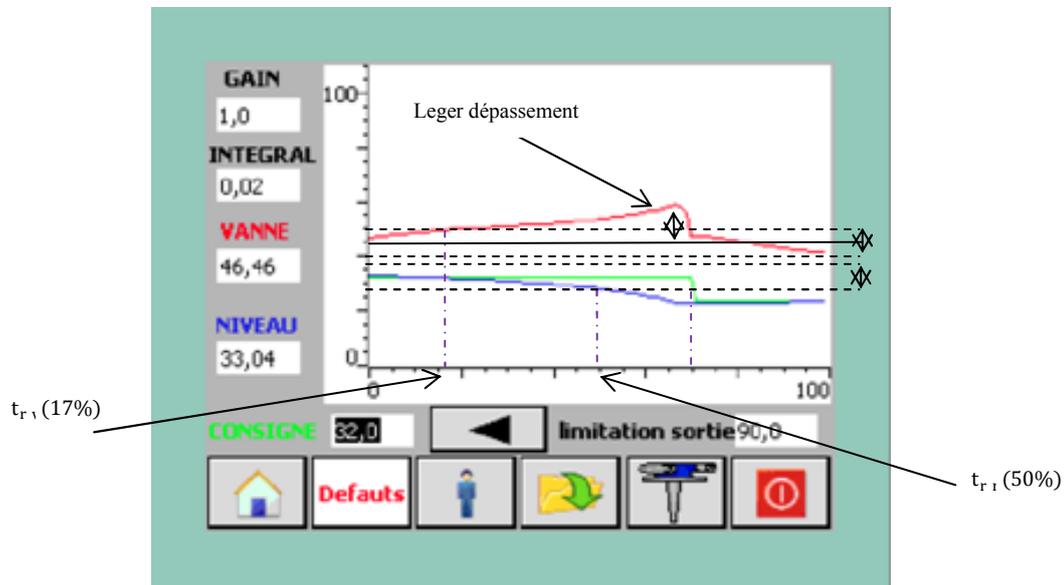
- L'effet déstabilisant se traduit par des **alternances**, autrement dit, le comportement de la vanne présente un **régime oscillatoire non amorti**.
- A chaque oscillation de la vanne qui est supérieure à 45%, le niveau, prend des valeurs inférieures à 31%, donc l'erreur sera supérieure à 1%.



**Figure IV.19** : Influence de la diminution du gain sur le système

Pour un gain **P=1** et l'intégral **I=0.02** :

- Lors du changement de la consigne à 85% axe du temps (72s) de **32% vers 24%**, le niveau réel entre dans le tube des  $\pm 5\%$  au environ de 37% axe du temps ce qui correspond à un temps de réponse de 48% (**43,3s**), et celui de la vanne est de **70,2s**, (7 % axe du temps).



**Figure IV.20** : Influence de la diminution du gain sur le comportement du système

La figure (IV.20) est la suite de l'évolution de la figure (IV.19) :

- Lors du changement de la consigne de niveau de (24% à 32%) à 70% sur l'axe du temps, le niveau réel entrant dans le tube  $\pm 5\%$  ne ressort plus à 50% (axe du temps) ce qui correspond à un temps de réponse de 20% (**18s**) et celui de la vanne est égal presque à 53% (**47,7s**).
- On note aussi un **léger dépassement** dans le comportement de la vanne. En effet, le système présente un comportement stable.

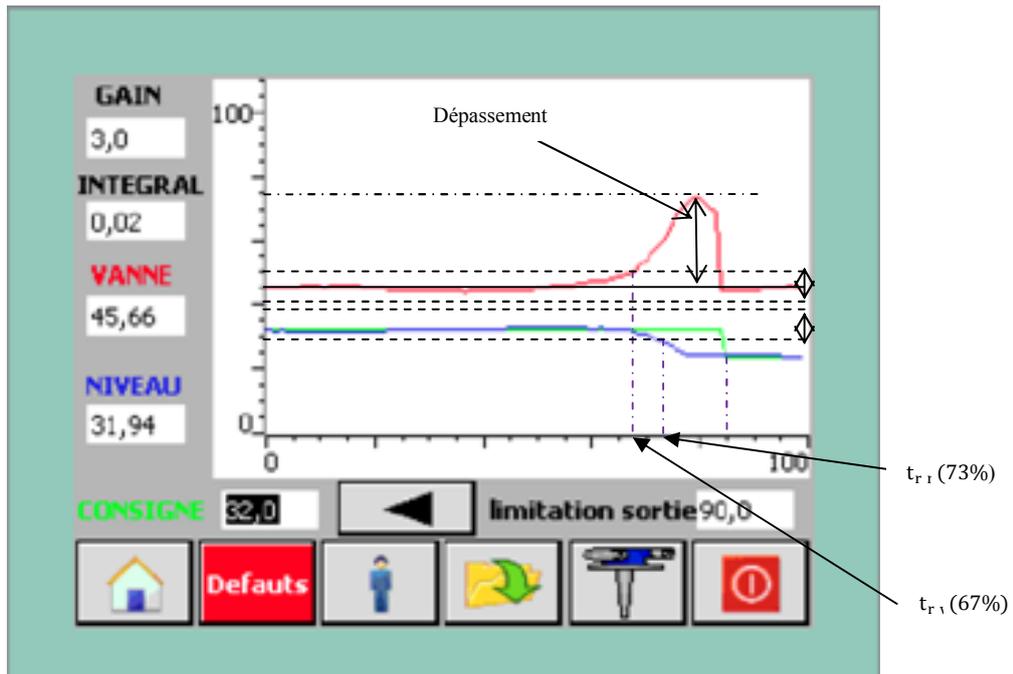


Figure IV.21 : Influence du gain sur la boucle de régulation

Pour un gain  $P=3$  et l'intégral  $I=0.02$  (paramètres du régulateur doux):

- Lors du changement de la consigne à 85% sur l'axe du temps de 24% vers 32%, le niveau réel entrant dans le tube des  $\pm 5\%$  à 73% (axe du temps) ce qui correspond à un temps de réponse de 10,8s, et celui de la vanne est de 15,3s ,67 % (axe du temps). On note aussi un dépassement de l'ordre de 30% au niveau de la vanne.

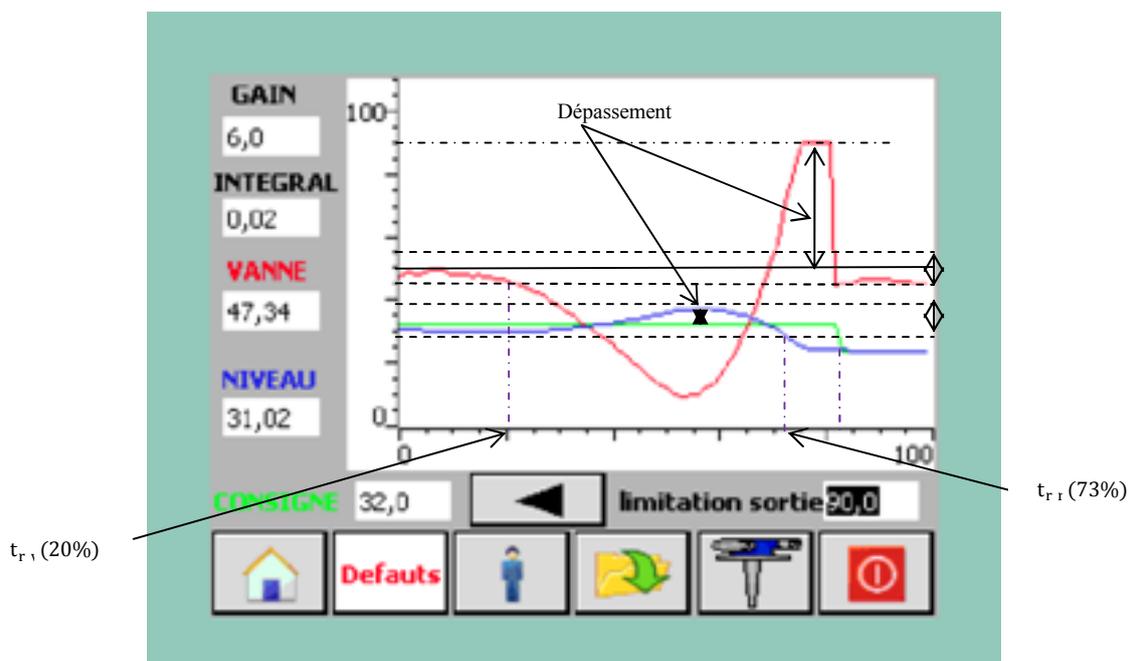


Figure IV.22 : Influence de l'augmentation du gain sur le procédé

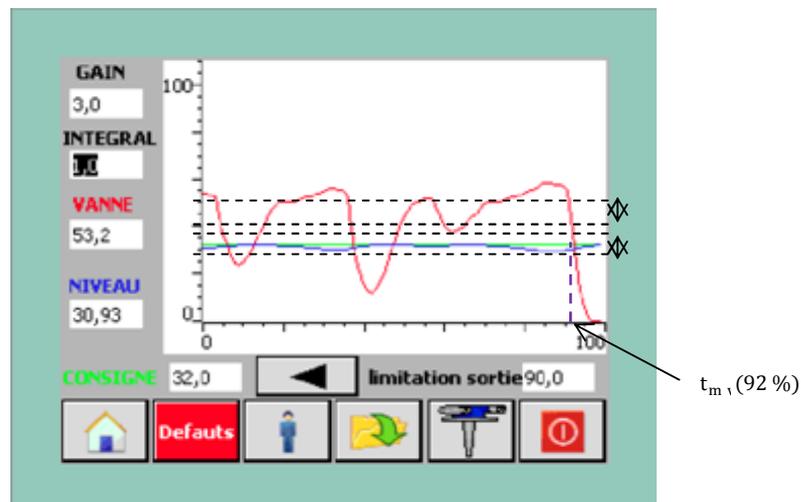
Pour un gain  $P=6$  et l'intégral  $I=0.02$  :

- Lors du changement de la consigne au environ de **83%** sur l'axe du temps de **24% vers 32%**, le niveau réel entrant dans le tube des  $\pm 5\%$  à 73% sur l'axe du temps ce qui correspond à un temps de réponse de 10% (**9s**), et celui de la vanne est de 63% (**56,7s**) , On note aussi un **dépassement** de l'ordre de **45%** dans le comportement de la vanne et un léger **dépassement** dans la courbe du niveau.

Si on fait une étude comparative des courbes (IV.21.22 et 23), pour une action intégrale de 0.02 et un gain P variable d'autant que :

- Le temps de réponse du niveau est dotant plus petit que le gain P est grand.
- Le meilleur temps de réponse de la vanne est obtenu pour un gain P qui est égal à 3.
- L'augmentation de la valeur du gain fait apparaitre des dépassements dans les deux courbes (niveau, vanne).

Autrement dit, on serait tenté de prendre des valeurs de gain élevées pour **accélérer** la réponse du procédé et ainsi diminuer l'écart, mais en contre partie on est limité par la **stabilité** de la boucle fermée. On voit bien que si **P** est trop grand, le niveau d'eau présente des fluctuations.



**Figure IV.23** : Influence de l'augmentation de l'action intégrale sur le procédé

Pour un gain  $P=3$  et l'intégral  $I=1$  (régime permanent):

- La vanne franchit pour la première fois son asymptote de 45% dans un intervalle de temps de 5% entre (97% et 92% axe du temps) cela signifie que le temps de montée de la vanne est de **4,5s**, et elle présente un **comportement oscillatoire non amorti**.
- Le niveau réel prend des valeurs avec des variations inférieures à 5% par rapport à la consigne mais aussi supérieures à 1%, ces variations sont dues au comportement de la vanne puisque le niveau dans la cuve dépend du taux d'ouverture de la vanne.

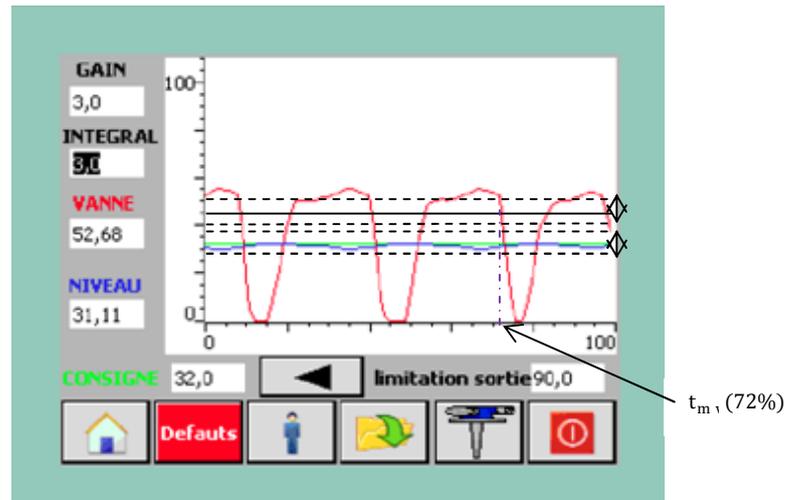


Figure IV.24 : Influence de l'augmentation de l'action intégrale sur notre système

Pour un gain  $P=3$  et l'intégral  $I=3$  (régime permanent) :

- La vanne présente un comportement **instable** qui se traduit par **des alternances presque périodiques** par rapport à sa consigne, le passage de la vanne de 0% à 45% (pourcentage d'ouverture) correspond à un intervalle de temps de 3% entre 75% et 72% (axe du temps), qui se traduit par un temps de montée de **2,7s**, et le **niveau** dépend toujours du pourcentage d'ouverture de la vanne.

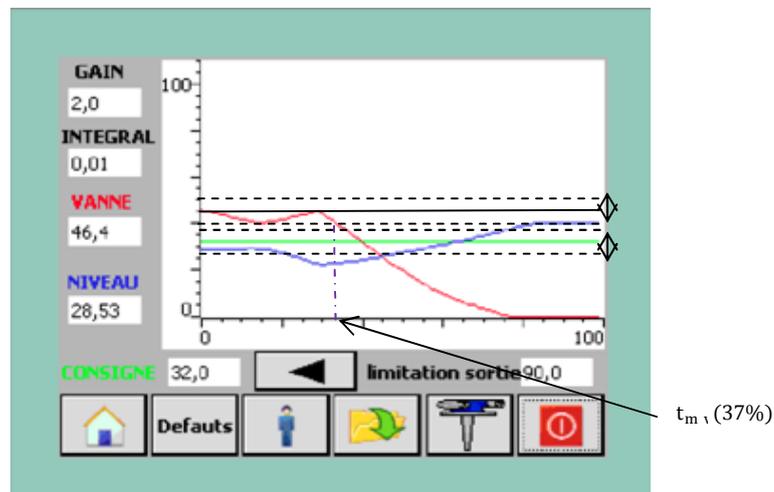
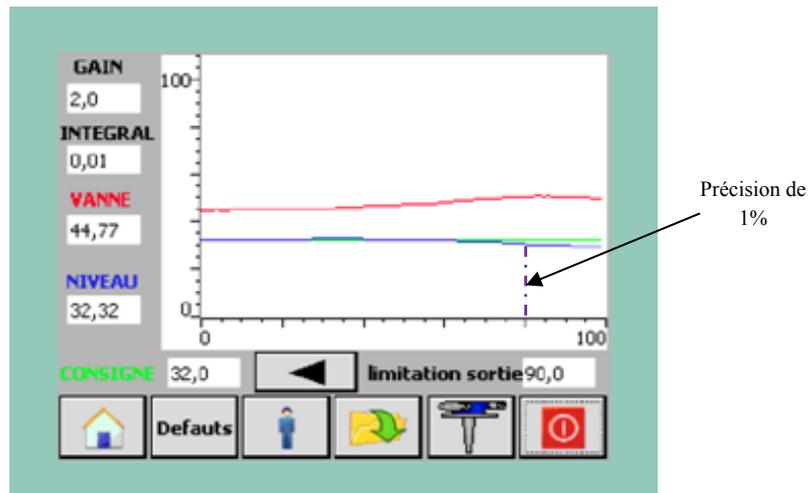


Figure IV.25 : Influence de la diminution de l'action intégrale le système

Pour un gain  $P=2$  et l'intégral  $I=0.01$  (régime permanent):

- La figure (IV.25) est la suite de la figure (IV.24) et juste avant la capture de cette image on a changé les paramètres du régulateur pour mettre en évidence **l'effet stabilisant** apporté au procédé avec une faible valeur de l'action intégrale.

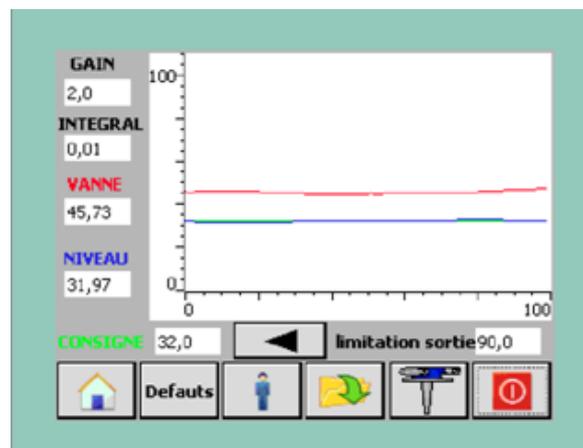
- Le temps de réponse de la vanne correspond à l'intervalle entre 76% et 37 % sur l'axe du temps et il est égal à 39% (**35,1s**), alors on constate aussi qu'une faible valeur de l'intégrale a pour effet de ralentir notre système (la vanne).
- Après 90s entre 100% et 0% (axe du temps), on voit bien que la précision de **1%** n'est pas atteinte car l'erreur est égale à **3,07 %**, cela est dû aux paramètres choisis qui causent une réponse longue du système.



**Figure IV.26** : Influence de la diminution de l'action intégrale sur le système

La figure (IV.26) est la suite de la figure (IV.25) :

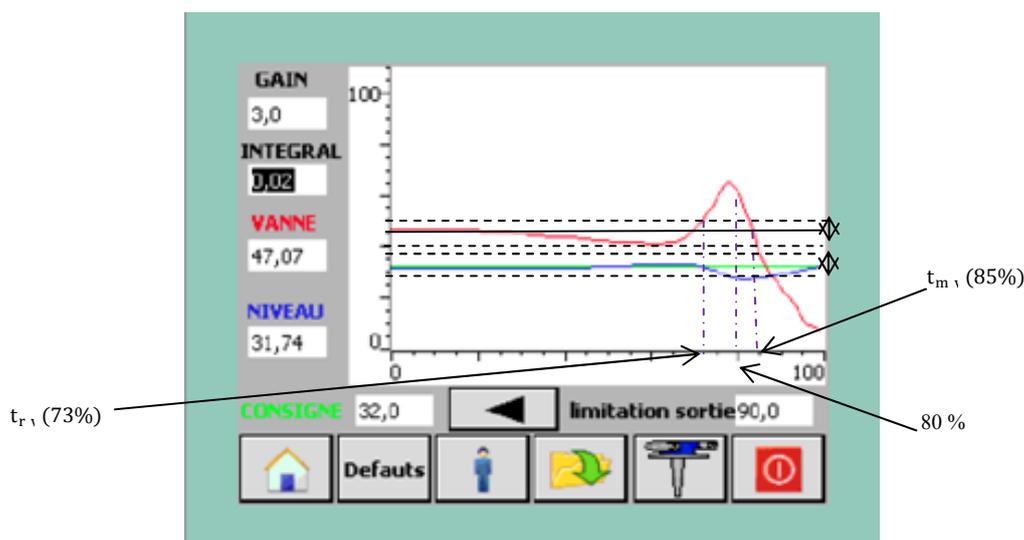
- La précision de 1% est atteinte à 80% (axe du temps) qui correspond à un temps de 20% (**18s**) et puisque cette figure est la suite de la figure (IV.25) donc le temps qui l'a fallut pour atteindre cette précision est de presque 110% (**108s**).



**Figure IV.27** : Comportement du système avec des faibles paramètres du régulateur

La figure (IV.27) est la suite de la figure (IV.28) :

Dans ce cas la précision est de **0,03 %** et la vanne présente un comportement parfaitement stable.



**Figure IV.28** : Effet du basculement du régulateur agressif vers le régulateur doux

On a vu dans les cas précédents l'intérêt de l'augmentation des actions **P** et **I**, il réside du fait qu'elles rendent le système rapide, mais l'inconvénient d'augmentation de ces paramètres réside du fait qu'ils rendent notre système instable (**vanne**). Et lorsque le comportement de la vanne est instable il engendre des variations du niveau. A cet effet, il est impossible d'atteindre une précision de **1%** au régime permanent.

D'autre part, lorsque ces actions sont **faibles** elles ont tendance à apporter un effet stabilisant (**vanne**) à notre boucle de régulation et pour atteindre une précision de 1%, autrement, la diminution de ces paramètres réside du fait qu'ils rendent notre système long.

L'intérêt du basculement du régulateur agressif vers le régulateur doux est d'assembler les avantages de ces actions pour avoir **un système stable, précis et rapide**.

La figure (IV.28) illustre cet intérêt :

Nous avons fait un basculement du régulateur agressif vers le régulateur doux aux environs de 80% sur l'axe du temps, entre 100% et 80% (axe du temps) correspond au **fonctionnement du régulateur agressif**, On voit bien que notre système (vanne) présente un comportement assez rapide avec un temps de montée qui est presque égal à **18s** et un **temps de réponse** égale à **25.2s** ( le calcul du temps de réponse et de montée commence juste avant la capture de cette figure de 5% ). Au delà de 80% (axe du temps) correspond au fonctionnement du régulateur doux avec lequel notre système présente un comportement stable avec une précision de 0,36%.

## **VI.8. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons exposé notre démarche qui a conduit à l'implémentation de notre travail.

En premier lieu, nous avons expliqué notre choix des périphériques adéquats. Puis nous avons procédé à la configuration du matériel et enfin montré notre méthode de programmation.

En deuxième lieu, nous avons procédé à la création des différentes vues à utiliser dans notre système.

En troisième lieu, nous avons présenté les résultats de simulations en temps réel du comportement de notre système, avec le régulateur doux et le régulateur agressif.

En dernier lieu nous avons conclu sur l'influence des actions proportionnelle et intégrale sur notre boucle de régulation plus exactement sur le comportement de la vanne qui a une influence directe sur le niveau d'eau dans la cuve.

*Conclusion  
générale*

## **Conclusion générale**

Pour procéder à la régulation de notre système nous avons fixé plusieurs objectifs. En premier lieu nous avons étudié la remplisseuse de l'eau minérale (STILJETE) puis essayé de comprendre son principe de remplissage et le principe de control de niveau de l'eau dans la cuve principale pour comprendre pourquoi le niveau de l'eau n'est pas stable dans la cuve et dans les bouteilles.

En outre, nous avons donné une idée générale de la régulation PID et nous avons identifié l'ensemble du matériel utilisé pour la mise au point d'une boucle de régulation de niveau ainsi que son principe de fonctionnement.

Le programme nous a permis de gérer le fonctionnement automatisé de notre boucle de régulation et de scinder le régulateur en deux modes : agressif et doux, permettant de répondre aux exigences du cahier de charges.

La supervision de la régulation au niveau de l'écran IHM contient l'ensemble des vues qui nous permettent de visualiser le comportement du système et de lui apporter des modifications si nécessaire sans modification du programme à l'intérieure de la CPU. En plus, la supervision nous a permis de réaliser une simulation en temps réel pour mettre en évidence l'influence des différents paramètres du régulateurs (doux et agressif) et l'ensemble des actions (P et I) sur le comportement de notre système.

A l'issus de ce travail, nous pouvons conclure :

- ✓ Le régulateur agressif est très réactif au changement de l'erreur et il a tendance à accélérer notre système et est utilisé quand l'erreur excède 10%.
- ✓ Le régulateur doux est conçu de telle manière à stabiliser le système et tendre l'erreur vers zéro. Ce mode est souple nettement moins rapide que le premier et est utilisé quand l'erreur est inférieure à 5%.
- ✓ La valeur optimale du gain Proportionnel (P) est celle qui donne la réponse la plus rapide avec un amortissement maximum et un écart minimum et il faut trouver pour son réglage un compromis entre la rapidité et la stabilité.
- ✓ L'action Intégrale (I) nous a permis d'avoir une précision inférieure à 1% au régime permanant et comme dans le cas de l'action proportionnelle, un dosage trop important de l'action intégrale engendre une instabilité au niveau de la vanne.

Le travail que nous avons mené avec succès au sein de l'entreprise « IFRI » m'a permis d'acquérir des connaissances techniques et pratiques qui viennent compléter les

enseignements théoriques acquis à l'université, et m'offre la possibilité de me familiariser avec le milieu industriel et avec la réalité du terrain dans lequel nous sommes appelés à travailler.

J'espère que notre modeste travail reste comme étant un document pour l'apprentissage de la programmation avec TIA Portal V11 pour les promotions à venir.

*Références*  
*Bibliographiques*

### Liste bibliographique

- [1] [www.jeuneafrique.com](http://www.jeuneafrique.com);
- [2] HASSAOUI jugurtha et KHALES karim, « Migration d'un automate S5-95U vers S7-300 SIEMENS, d'une remplisseuse de bouteilles », Mémoire de fin d'étude master deux, université de Bejaïa, promotion 2017 ;
- [3] Gilles morvan, « machines-remplisseuse-doseuse-eau-plate » ;
- [4] [www.docplayer.fr](http://www.docplayer.fr);
- [5] [www.ocme.com](http://www.ocme.com);
- [6] Sasib Beveridge medium speed S.P.A, « installation et machines pour la mise en bouteille, Italie », 1997.
- [7] Claude chevassu et Grégory valentin, « machines asynchrones cours et problèmes », version du 21 septembre 2014
- [8] PHILIPPE berger, « les moteurs électriques à courant alternatif » ;
- [9] [www.schneider-electric.com/relays](http://www.schneider-electric.com/relays);
- [10] Groupe Schneider, « Catalogue distribution basse tension », 1998-1999 ;
- [11] MICHEL grout et PATRICK salaun, « Instrumentation industriel » ;
- [12] LUC dugard, « Outils de modélisation, méthodes et architectures de commande » ;
- [13] YVES granjon, « système linéaires, non linéaires, à temps continue, à temps discret, représentation d'état » ; Edition dunod ;
- [14] F. BINET, « Préparation Agrégations internes B1 & B3 cours d'asservissement » ;
- [15] OTMAN filali, « Automatique linéaire » ;
- [16] Document de formation T I A, « Techniques de régulation avec STEP 7 » ;
- [17] [www.specialautom.net](http://www.specialautom.net);
- [18] [www.elearn.univ-ouargla.dz](http://www.elearn.univ-ouargla.dz), « cours régulation automatique » ;
- [19] WILLIAM bolton, « automates programmables industriels », édition2 ;
- [20] Document Siemens, « Automate programmable S7-300, caractéristiques électriques et techniques des CPU SIMATIC », Edition Siemens 2001 ;
- [21] Document Siemens, « Traitement de valeurs analogiques » ;
- [22] Endress+Hauser, « mesure de niveau capacitif » ;
- [23] Landis & Staefa Division, « 1998 Siemens Building Technologies AG », CA1N4023F / 02.2000 ;
- [24] [www.thermexcel.com](http://www.thermexcel.com);

## **Bibliographie**

---

[25] Burkurt fluide control Systems, « vannes process et de régulation » ;

[26] Document de formation pour une solution complète d'automatisation T I A module b5 A&D SCE « Automatisierung- und Antriebstechnik, Siemens A&D Cooperates with Education », Edition 2005 ;

[27] Document de formation pour une solution complète d'automatisation T I A module A4 A&D SCE « Automatisierung- und Antriebstechnik, Siemens A&D Cooperates with Education», Edition 2004 ;

[28] L. ANDJOUH et R. TOUATI, « Automatisation et supervision de la fosse de relevage de la raffinerie d'huile (Cevital) », Mémoire Master 2, Université de Boumerdes, promotion 2013 ;

## *Annexe I*

### ✓ **Table des variables API**

C'est dans la table des variables API que l'on va pouvoir déclarer toutes les variables et les constantes utilisées dans le programme.

Lorsqu'on définit une variable API, il faut définir :

- Un nom : c'est l'adressage symbolique de la variable.
- Le type de donnée : BOOL, INT, . . .
- L'adresse absolue : par exemple Q1.5.

On peut également insérer un commentaire qui nous renseigne sur cette variable. Le commentaire peut être visible dans chaque réseau utilisant cette variable.

### ✓ **Adresse symbolique et absolue**

Dans TIA Portal, toutes les variables globales (entrées, sorties, mémentos etc...) possèdent une adresse symbolique et une adresse absolue.

- L'adresse absolue représente l'identificateur d'opérande (I, Q, M, . . .) et son adresse et numéro de bit.
- L'adresse symbolique correspond au nom que l'utilisateur a donné à la variable (Bouton Marche).

Le lien entre les adresses symbolique et absolue se fait dans la table des variables API.

### ✓ **Types de variable utilisée en STEP7**

TYPE	TAILLE(Bits)
bool	1
Real	32
Int	16
Byte	8
Word	16
Dword	32
Dint	32
Char	8
Time	32
S5time	16
Date	16
Time of	32

✓ **Les Blocs utilisateurs**

- **OB (Bloc d'Organisation) :**

Les blocs d'organisation (OB) constituent l'interface entre le système d'exploitation et le programme utilisateur. Ils sont appelés par le système d'exploitation et gèrent le traitement de programme cyclique, ainsi que le comportement à la mise en route de l'automate programmable et le traitement des erreurs. L'exécution d'un OB peut être interrompue par l'appel d'un autre OB. Cette interruption se fait selon la priorité : les OB de priorité plus élevée interrompent les OB de priorité plus faible.

- **FB (Bloc de fonction) :**

Le FB est à disposition via un espace mémoire correspondant. Si un FB est appelé, il lui est attribué un bloc de données (DB). On peut accéder aux données de cette instance DB par des appels depuis le FB. Un FB peut être attribué à différents DB. D'autres FB et d'autres FC peuvent être appelés dans un bloc de fonction par des commandes d'appel de blocs.

- **FC (Fonction) :**

FC ne possède pas un espace mémoire attribué. Les données locales d'une fonction sont perdues après le traitement de la fonction. D'autres FB et FC peuvent être appelés dans une fonction par des commandes d'appel de blocs.

- **DB (Bloc de données) :**

Les DB sont employés afin de tenir à disposition de l'espace mémoire pour les variables de données. Il y a deux catégories de blocs de données. Les DB globaux où tous les OB, FB et FC peuvent lire des données enregistrées et écrire eux-mêmes des données dans le DB. Les instances DB sont attribuées à un FB défini.

## Annexe II

## ✓ Table de variables API :

régulation de niveau d'une rempliseuse de l'eau ménager(sasib) ▶ API\_1 [CPU 315-2 PN/DP] ▶ Variables API

Variables    Constantes utilisateur    Constantes système

Variables API

	Nom	Table des variables	Type de données	Adresse	Réma...	Visible..	Acces...	Commentaire
1	sonde de niveau cuve	Table de variabl...	Int	%IW368		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	vanne modulante	Table de variables s..	Int	%IW352		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	fréquence 10hz	Table de variables s..	Bool	%M10.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	fréquence 1hz	Table de variables s..	Bool	%M10.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	fron1	Table de variables s..	Bool	%M0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	Tag_1	Table de variables s..	Int	%QW362		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	<Ajouter>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

## ✓ Paramètres mise à l'échelle d'entrées (DB1) :

...\_1 [CPU 315-2 PN/DP] ▶ Blocs de programme ▶ mise a l'echelle entrée sortie ▶ paramaitre mise a l'échelle entrée [DB1]

paramaitre mise a l'échelle entrée

	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Commentaire
1	Static						
2	sonde de niveau capa..	*données ec...	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	IWint	Int	0.0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	IWreal	Real	2.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	maximum niveau	Real	6.0	100.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	minimum niveau	Real	10.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	décalage	Real	14.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	valeur INT	Int	18.0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	valeur real de nivea	Real	20.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

✓ Paramètres mise à l'échelle de sorties (DB2) :

... [CPU 315-2 PN/DP] ▶ Blocs de programme ▶ mise a l'echelle entrée sortie ▶ paramaitres de l'echelle de sortie [DB2]

paramaitres de l'echelle de sortie

	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Commentaire
1	Static						
2	alimentation de la van...	*données ec...	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	maximum points	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	minimum points	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	max vanne modul...	Real	8.0	100.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	min vanne modula...	Real	12.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	decalage	Real	16.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	entrée consigne rea	Real	20.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	sortie ne pions	Int	24.0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

✓ Paramètres régulateur PID agressif et doux(DB3) :

... 315-2 PN/DP > Blocs de programme > regulateur pid > paramaitre régulateur pid agresif et doux [DB3]

paramaitre régulateur pid agresif et doux

	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Commentaire
1	Static						
2	pid agresif	*données pid*	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	gain p	Real	0.0	5.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	integral i	Real	4.0	1.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	derivé d	Real	8.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	rapport gain	Real	12.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	rapport integral	Real	16.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	rapport dérivé	Real	20.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	mémoire integral	Real	24.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	mémoire gain	Real	28.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	mémoire dérivé	Real	32.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	erreur statique	Real	36.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	erreur dynamique	Real	40.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	pid doux	*données pid*	44.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	gain p	Real	0.0	3.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16	integral i	Real	4.0	0.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17	derivé d	Real	8.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18	rapport gain	Real	12.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19	rapport integral	Real	16.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20	rapport dérivé	Real	20.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21	mémoire integral	Real	24.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
22	mémoire gain	Real	28.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
23	mémoire dérivé	Real	32.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
24	erreur statique	Real	36.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
25	erreur dynamique	Real	40.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

✓ Paramètres de la gestion de la régulation (DB4) :

## Annexe II

...asib) > API\_1 [CPU 315-2 PN/DP] > Blocs de programme > regulation > paramaitre de la gestion de la regulation [DB4]

**paramaitre de la gestion de la regulation**

	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Commentaire
1	Static						
2	consigne de niveau	Real	0.0	32.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	erreur	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	basculement vers pid ..	Real	8.0	5.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	basculement vers pid ..	Real	12.0	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	choix doux	Bool	16.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	choix agresif	Bool	16.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

### ✓ Variable IHM :

régulation de niveau d'une rempliseuse de l'eau mérial(sasib) > HM\_1 [KTP600 Basic PN] > Variables IHM

**Variables IHM**

	Nom	Table des variables	Type de données	Connexion	Nom API
	Numéro_vue_variable	Table de variables standard	Uint	<Variable int...	
	paramaitre de la gestion de la r.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitre mise a léchelle entr..	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitre régulateur pid agres.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitre régulateur pid agres.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitre régulateur pid agres.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitre régulateur pid agres.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitre régulateur pid agres.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitres de lechelle de sorti.	Table de variables standard	Real	Liaison_IHM	API_1
	paramaitres de lechelle de sorti.	Table de variables standard	Int	Liaison_IHM	API_1
	<ajouter>				

## **Résumé**

Ce mémoire présente une méthodologie générale sur l'automatisation et la supervision d'une boucle de régulation de niveau pour une remplisseuse d'eau minérale et d'autre part, la création et la programmation d'un régulateur PID qui est scindé en deux parties dans un automate S7-300.

Le programme élaboré avec le logiciel STEP7 permet, une fois transféré dans l'automate S7-300 la gestion de la régulation. Une interface homme-machine à base du logiciel WinCC flexible a été créée, celle-ci permet l'affichage en ligne des variables caractéristique du processus.

Une simulation du projet a été faite sous le logiciel WinCC.

## **Abstract**

This memory presents a general methodology on the automation and supervision of a level control loop for a mineral water filling machine and another hand, the creation and programming of a PID regulator which is split in two parts in an S7-300 automaton.

The program developed with the STEP7 software allows the control of the control system once transferred to the S7-300 PLC. A man-machine interface based on the WinCC flexible software has been created, which enables online display of the characteristic variables of the process.

A simulation of the project was done under the WinCC software.