

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou**



**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**  
**Département d'Automatique**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme

*D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE*

*Thème*

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UNE LOI DE COMMANDE A MODELE  
INTERNE SUR AUTOMATE PROGRAMMABLE POUR LE CONTROLE D'UN PROCEDURE  
DE NEUTRALISATION**

Proposé par :  
La société canadienne SNC-LAVALIN

Dirigé par :  
Mr MAIDI Ahmed

Soutenu le : 04/07/2009

Devant le jury d'examen composé de :  
Mr MELLAH  
Mme KHERRAZ  
Mr HASNAOUI

Présenté par :  
Mr ATMIMOU Rafik  
Mr FELLAH Djaffar

*Promotion 2009*

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou**



**SNC-LAVALIN**  
**International**

**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**  
**Département d'Automatique**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme

*D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE*

*Thème*

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UNE LOI DE COMMANDE A MODELE  
INTERNE SUR AUTOMATE PROGRAMMABLE POUR LE CONTROLE D'UN PROCEDURE  
DE NEUTRALISATION**

Proposé par :  
La société canadienne SNC-LAVALIN

Présenté par :  
Mr ATMIMOU Rafik  
Mr FELLAH Djaffar

Dirigé par :  
Mr MAIDI Ahmed

Soutenu le : 04/07/2009      Devant le jury d'examen composé de :  
Mr MELLAH  
Mme KHERRAZ  
Mr HASNAOUI

*Promotion 2009*

# *Remerciements*

*Arrivé au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude et notre profond respect pour notre promoteur Mr MAIDI pour son aide et suivi durant l'élaboration de ce travail.*










*Nous remercions Mr KHEFFACHE directeur du service maintenance et tout le personnel de SNC- LAVALIN qui nous ont toujours accueillis avec beaucoup de gentillesse et de patience.*

*Nous remercions également toute les personne qui nous ont soutenu et encouragé pour aller au bout de ce travail, en particulier nos familles.*

*Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de juger ce travail, d'apporter leurs réflexion et suggestions scientifiques.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

-  *A mes parents pour leurs sacrifices pour m'élevé et me voir arrivé à ce stade,*
-  *A la mémoire de mes grands parents paternels et maternels, que dieu les accueille dans son vaste paradis,*
-  *A ma grande mère maternelle,*
-  *A mes frères Lyès et Abderezak et ma sœur unique Rachida,*
-  *A mes oncles et tentes,*
-  *A mes cousins,*
-  *A mes amis (es) et surtout Kamel, Mohand, Wahib, Marzouk, Rabah Ryma...ect*
-  *A tous mes camarades d'études depuis le primaire,*
-  *Et surtout à mon binôme, avec qui j'ai partagé ce travail.*

*Rafik.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

- ✚ A la mémoire de mon père, au souvenir auquel j'ai toujours tiré la force nécessaire tout au long de ma vie.*
- ✚ A mon seul et unique source de lumière lorsque tout est sombre, ma très chère mère, c'est grâce à toi et rien que toi que tout est ainsi.*
- ✚ A celle qui ma offert le bonheur et le malheur à la fois : Niroche.*
- ✚ A mes frères : Belaid, Amar, et Farid.*
- ✚ A mes sœurs : Djohar, Zahia, Farida, Ouiza et Bahia.*
- ✚ A mes deux anges : Damia et M'hand aghiless.*
- ✚ A mes amis du cœur : Mourad, Nadine, Nacer, Chérifa, Amokrane, Karima, Mouhand, Taratata, Nadia, Micha ...etc.*
- ✚ A mes enseignants qui ont contribués à ma formation depuis mon jeune âge.*
- ✚ A mon très cher binôme.*

*Djaffar.*

# SOMMAIRE

## Chapitre I : Présentation de la station de traitement d'eau TAKSEBT

Introduction.....	01
I.1 Généralités sur la station de traitement de l'eau TAKSEBT.....	01
I.1.1 Objectifs de la station.....	01
I.1.2 Qualité de l'eau d'entrée.....	01
I.1.3 Qualité de l'eau de sortie.....	02
I.2 Organisation de la station.....	03
I.2.1 Bâtiment administratif.....	03
I.2.2 Bâtiment électrique.....	04
I.2.3 Bâtiment chimie.....	05
I.2.4 Bâtiment chlore.....	06
I.2.5 Bâtiment chaux.....	06
I.1.6 Bâtiment acide.....	07
I.2.7 Mécanismes du traitement de l'eau.....	08
I.3 Séquence de traitement de l'eau.....	10
I.3.1 Traitement de l'eau brute.....	10
I.3.2 Traitement des boues.....	13
I.3.3 Préparation et dosage des réactifs.....	13
I.4 Point sur la régulation du pH de l'eau.....	16
Conclusion.....	17

## Chapitre II : Etude et identification du procédé de neutralisation d'eau

Introduction.....	18
II.1 Généralités sur le processus de neutralisation de l'eau.....	18
II.1.1 Potentiel Hydrogène (pH.....	18
II.1.2 Le réactif utilisé.....	19
II.1.3 Taux de traitement / Consommation journalière.....	19
II.2 Elément constituant le procédé de neutralisation.....	19
II.2.1 Poste de dépotage.....	19
II.2.2 Dessacheuse.....	19

II.2.3 Surpresseur.....	20
II.2.4 Silos de stockage.....	20
II.2.5 Cuves de préparation.....	20
II.2.6 Pompes.....	21
III.2.7 Vannes.....	21
II.2.7 Instrumentation du procédé.....	21
II.2.8 Armoires TBTF et TBTA.....	22
II.3 Fonctionnement du procédé.....	23
II.3.1 Remplissage des silos de chaux.....	23
II.3.2 Préparation de la solution lait de chaux.....	24
II.3.3 Dosage de lait de chaux.....	27
II.3.4 Dilution de lait de chaux.....	29
II.3.5 Boucle de soutirage.....	30
II.3.6 Injection de lait de chaux diluée.....	31
II.4 Identification du procédé de neutralisation.....	32
II.4.1 Expérience réalisée.....	32
II.4.2 Résultats obtenus.....	33
II.4.3 Identification par la méthode du modèle.....	35
Conclusion.....	38

### **Chapitre III : commande à modèle interne du procédé de neutralisation**

Introduction.....	39
III.1 Régulateur à modèle interne.....	39
III.1.1 Présentation et avantages du régulateur.....	39
III.2 Principe de la commande à modèle interne.....	40
III.2.1 Présentation intuitive de la structure IMC.....	40
III.2.2 Propriétés de la structure IMC.....	42
III.3 Méthodologie de synthèse du régulateur.....	45
III.3.1 Principe de l'approche.....	45
III.3.2 Synthèse de $Q_0$ .....	46
III.3.3 Synthèse du filtre F.....	46
III.3.4 Règles standard de synthèse dans le cas d'un système stable.....	48
III.4 synthèse de la loi de commande.....	49
III.4.1 Synthèse de $Q_0$ .....	49
III.4.2 Synthèse du filtre F.....	51

III.4.3 Structure finale du régulateur.....	51
III.5 Simulation du régulateur.....	52
III.5.1 Système sans perturbation.....	53
III.5.2 Système avec une perturbation qui augmente le pH (positive).....	54
III.5.3 Système avec une perturbation qui diminue le pH (négative).....	56
III.5.4 Résultat des simulations.....	57
III.6 Boucle de régulation adoptée pour l'opération de neutralisation.....	57
III.6.1 Eléments constituant la boucle de régulation.....	58
Conclusion.....	68

## **Chapitre IV : Programmation de la loi de commande en PL7**

Introduction.....	69
IV.1 Logiciel de programmation PL7.....	69
IV.1.1 Présentation générale.....	69
IV.1.2 Langages de programmation en PL7.....	70
IV.1.3 Notion de variables.....	74
IV.1.4 Notion d'un repère.....	75
IV.1.5 Adressage des entrées/sorties des esclaves sur le bus AS-i.....	76
IV.1.6 Instructions de PL7.....	77
IV.1.7 Editeurs de PL7.....	78
IV.1.8 Chargement de programme dans l'automate.....	82
IV.2 Algorithme de calcul de la loi de commande.....	83
IV.3 Programmation de la loi de commande .....	84
IV.3.1 Configuration matérielle.....	84
IV.3.2 Configuration logicielle.....	85
IV.3.3 Déclaration des variables.....	86
IV.3.4 Création d'une tâche MAST.....	86
Conclusion.....	87

## **Introduction**

Au cours du XXe siècle, le monde a connu un formidable essor démographique. Mais alors que la population du monde triplait, la consommation en eau de l'humanité était multipliée par plus de six, par conséquent, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupante pour tous les pays du monde notamment ceux qui traversent des périodes de sécheresse comme notre pays l'Algérie.

Le problème de l'eau dans le monde n'est pas uniquement quantitatif, il est aussi qualitatif, sachant que l'approvisionnement en eau se fait à partir des grands barrages, cependant cette eau nécessite inévitablement de subir un processus de traitement afin qu'elle devienne potable et aussi la protéger adéquatement jusqu'à son arrivée aux utilisateurs.

Dans notre région, le ministère de ressource en eau a chargé la société canadienne SNC-LAVALIN de construire une station de traitement de l'eau à TAKSBET dans la wilaya de Tizi-Ouzou pour alimenter plusieurs régions du centre du pays en eau potable. La station de traitement TAKSBET est très récente et fonctionne avec une technologie d'instrumentation et de commande récente.

L'objectif de notre projet de fin d'études est de concevoir une loi de commande robuste pour le procédé de neutralisation de l'eau afin d'assurer une meilleure qualité à l'eau en terme du potentiel hydrogène (pH). Comme le modèle qui décrit le procédé de neutralisation est complexe, nous avons opté pour la commande à modèle interne CMI. Cette dernière permet de faire face aux erreurs de modélisation, aux variations paramétriques, et les perturbations affectent le procédé. Comme la loi de commande sera implémentée sur un automate programmable en langage, la version numérique de la commande à modèle interne a été considérée.

Ainsi, le mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre sera consacré à la description générale de la station et son fonctionnement en particulier le bâtiment chaud.

- Le deuxième chapitre présente une étude détaillée du procédé de neutralisation, et l'identification de ce modèle mathématique sous forme de fonction de transfert.
- Le chapitre trois sera consacré au principe de la commande à modèle interne, et son application pour la commande du procédé de neutralisation tout en décrivant les différentes parties de la boucle de régulation à base de régulateur CMI.
- Le dernier chapitre est consacré à la programmation avec le langage PL7 de la loi de commande à modèle interne.

Et le mémoire se termine par une conclusion générale sur le travail réalisé.

# **CHAPITRE I**

***Présentation de la station de  
traitement d'eau TAKSEBT***

## **Introduction**

La station de traitement de l'eau TAKSEBT est construite dans la région THALA BOUNAN dans la wilaya de TIZOU-OUZOU pour alimenter en eau potable plusieurs wilayas du centre du pays.

La production nominale de la station est de 605 000 m<sup>3</sup>/j (7 000 l/s) basée sur un approvisionnement en eau brute de 616 000 m<sup>3</sup>/j. La capacité hydraulique nominale de la station est de 647 000 m<sup>3</sup>/j, prenant en compte un débit recerclé de 5% du débit d'eau brute.

Dans ce présent chapitre, une description générale de la station de traitement est donnée, en particulier, le bâtiment chaux dont l'objectif est la régulation du Ph.

## **I.1 Généralités**

### **I.1.1 Objectifs de la station**

La station de traitement de l'eau TAKSEBT est conçue pour pouvoir assurer une alimentation fiable et continue en eau potable, exempte d'organismes pathogènes. Dans les conditions de qualité de l'eau contractuelles et d'une exploitation normale, la qualité finale de l'eau après traitement doit conforme aux normes 100 % du temps.

### **I.1.2 Qualité de l'eau d'entrée**

L'eau brute alimentant le barrage de TAKSEBT provient de l'oued AISSI et de l'oued BOUG DOURA, sachant que l'alimentation de la station en eau brute se fait à partir de ce barrage, la conception de la station de traitement est basée sur les valeurs de la qualité de l'eau du tableau suivant :

Paramètres	Unité	Valeurs contractuelles		
		Min	Max	Typique
Turbidité	NTU	1	100	5
Couleur	Hazan	5	25	6
Température	C	10	30	18
Fer	Mg/l Fe	0.05	5	0.15
Manganèse	Mg/l Mg	15	60	24
PH	-	7	9	8
E. coli	MPN/100ml	5	5000	100
Coliformes totaux	MPN/100ml	10	10000	200

Dans le futur, la qualité de l'eau peut encore évoluer. La couleur peut s'élever par développement de plancton en période chaude, et le pH peut s'abaisser ainsi que la teneur en oxygène.

### I.1.3 Qualité de l'eau de sortie

Après un processus de traitement, basé sur plusieurs étapes, la qualité d'eau potable à distribuer doit être adéquate aux normes suivantes :

- Turbidité (avant injection de chaux) : inférieur à 1.0 NTU,
- Couleur : inférieur à 5° Hazen,
- Aluminium : inférieur à 0.2 mg/l,
- Fer : inférieur à 0.3 mg/l,
- Manganèse : inférieur à 0.1 mg/l,
- pH : 6.5 à 8.5,
- E coli ou bactérie thermo-tolérante : néant sur tout échantillon de 100ml,
- Total bactéries coliforme : néant sur tout échantillon de 100m,
- Cout et odeur : acceptable pour les consommateurs.

En ce qui concerne les autres paramètres individuels de qualité de l'eau traitée comme la quantité (Mg/l) de Nitrite, Sodium et Chlorure...etc. Ceux-ci seront inférieurs aux valeurs désirables les plus élevées recommandées par les normes les plus récentes de l'OMS pour les eaux de boisson.

## **I.2 Organisation de la station**

La station de TAKSEBT est construite en blocs modulaires. Chaque bloc est conçu pour réaliser des fonctions spécifiques nécessaires pour le fonctionnement de la station. Elle se présente ainsi :

### **I.2.1 Bâtiment administratif**

Il porte ce nom du fait qu'il contient le bloc administratif, cependant il abrite deux autres éléments essentiels qui sont, le laboratoire et la salle de contrôle et de commande.

- **Bloc administratif**

Pour le contrôle et la gestion de la station, un bloc administratif est prévu, il contient les bureaux des fonctionnaires travaillant dans la station, à leur tête le directeur général. L'activité administrative remplit des fonctions essentielles : répondre aux demandes d'informations légales (déclarations fiscales, comptabilité, enquête, douanes), prendre et contrôler les décisions, coordonner les acteurs de l'organisation, notamment le personnel.

- **Laboratoire d'analyse**

Un laboratoire d'analyse interne à la station est installé au sein du bâtiment administratif, il permet l'analyse régulière de la qualité de l'eau à chaque étape de traitement, elle est indispensable pour vérifier l'efficacité du processus de traitement et garantir une eau potable sûre et de bonne qualité. Les résultats de l'analyse permettent de prendre les mesures nécessaires pour

régler des problèmes particuliers. Le forfait d'analyse de base de l'eau potable comprend l'analyse de la turbidité, Fer, Manganèse, pH...ect.

- **Salle de contrôle et commande**

La salle de contrôle permet de piloter l'ensemble des procédés de traitement de la station de TAKSEBT, qu'ils s'agissent des décanteurs, flocculateurs, filtres, ... etc. Des programmes informatiques implémentés dans des automates programmables (API) aident à l'optimisation en continu des paramètres de conduite de la station. Toutes les données de commande et d'exploitation de chaque unité sont centralisées dans la salle de contrôle de la station, ainsi que les unités d'exploitation éloignées (stations de pompage et les grands réservoirs) sont reliées au processus global par lignes dédiées.

### **I.2.2 Bâtiment électrique**

La particularité d'une station de traitement de l'eau c'est qu'elle doit fonctionner sans interruption, étant donné que l'alimentation en énergie électrique de la station de TAKSEBT provient du réseau SONALGAZ qui n'est pas à l'abri des coupures pour maintenance ou d'autres raisons, un bâtiment dit électrique assure l'alimentation permanente en énergie électrique de la station en cas des coupures ou des perturbations dans le réseau.

Les composants essentiels suivant assurent l'alimentation et la production de l'énergie électrique au sein du bâtiment :

- Deux transformateurs abaisseurs qui fonctionnent en alternance, en cas d'arrêt (panne) de l'un l'autre fonctionne, ils sont alimentés de l'énergie du réseau qui est de 30kV et nous donne en sortie une tension de 400V pour alimenter les équipements de la station.
- Deux groupes électrogènes de puissance 1000kVA chacun, comme les transformateurs, ils fonctionnent en alternance, l'un d'eux doit démarrer

après 60 seconde de la coupure de l'énergie du réseau, il donne en sortie une tension de 230V/400V.

- Tableau général basse tension (TGBT), c'est le tableau électrique basse tension qui est utilisé dans les grandes installations électriques. Dans la station, il assure le lien entre l'énergie électrique en provenance des transformateurs ou des groupes électrogènes et les armoires électriques qui sont installés dans chaque bâtiment et dans les différents compartiments. Il permet aussi une adaptation de tension pour la suite de l'installation et la commande autonome de l'alimentation ou coupure de l'énergie pour chaque bâtiment. Ce dernier est très nécessaire pour les raisons de maintenance.
- Batterie de compensation globale, elle est raccordée en tête d'installation pour assurer la compensation pour l'ensemble des charges. Elle convient essentiellement à supprimer les pénalités et soulager le poste de transformation ; l'autre objectif de la compensation d'énergie réactive est de réduire le courant appelé sur le réseau.

### **I.2.3 Bâtiment chimie**

Le stockage, la préparation et le dosage des produits chimiques utilisés dans le traitement chimique de l'eau sont fait dans le bâtiment chimie où quatre solutions sont préparées à partir des réactifs suivant : le polymère, charbon actif en poudre, sulfate d'aluminium et permanganate de potassium. Des utilitaires sont installés pour le stockage, la préparation des solutions à des concentrations requises et leurs injections aux doses requises dans la chambre dissipation et les chambres de mélanges. En général, on trouve dans le bâtiment :

- Trémies de stockage pour chacun des quatre produits,
- Cuves de préparation des solutions par les produits chimiques,
- Pompes doseuses pour injection de chaque produit,
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.2.4 Bâtiment chlore**

Le chlore est livré à la station en tanks qui sont stockés dans le bâtiment. Chaque tank est pressurisé et contient à la fois du chlore liquide, en partie basse, et du chlore gazeux, en partie haute. Le bâtiment contient deux lignes de soutirages connectées chacune à 2 tanks. Le chlore liquide est ensuite dirigé vers les évaporateurs, où il est chauffé à température constante pour passer en phase gazeuse. En aucun cas du chlore ne doit se trouver sous forme liquide au-delà de ce point. Le chlore gazeux dilué dans l'eau est dirigé, suivant les choix de l'exploitant, vers les points d'injection du chlore qu'on trouve dans les chambres de mélanges, les canaux d'eau décantée et dans les cuves de contacts. Le bâtiment contient essentiellement :

- Des fûts à connecter aux tanks pour le soutirage du chlore (liquide et gazeux),
- Des évaporateurs, le chlore soutiré sous forme liquide est dirigé vers les évaporateurs, où il passe en phase gazeuse.
- Pompes d'eau motrices et hydro-éjecteurs. L'hydro-éjecteur est un dispositif de mélange entre chlore gazeux et eau. Les pompes d'eau motrice assurent un débit d'eau à travers l'hydro-éjecteur,
- Chloromètres qui permettent de doser et de mesurer précisément la quantité de chlore injectée.
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.2.5 Bâtiment chaux**

Dans ce bâtiment, un système est conçu pour l'utilisation de la chaux en poudre afin de préparer une solution de lait de chaux par dilution de la chaux en poudre dans de l'eau traitée. Ensuite le lait de chaux est injecté à l'eau dans le réservoir d'eau traitée. Le stockage de la chaux consiste en silos avec un grand volume de stockage, les silos sont complets avec les utilitaires de préparation et d'injection de lait de chaux. Le système de préparation et injection de lait chaux est complètement

automatisé. Cependant une intervention d'un opérateur est nécessaire pour la détermination du volume de lait de chaux à injecter. Le bâtiment est principalement composé de :

- Silos de stockage de la chaux,
- Bacs de préparation de lait de chaux,
- Pompes doseuses pour l'injection,
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.1.6 Bâtiment acide**

Le traitement de l'eau fait inévitablement appel à des réactifs qui doivent pouvoir être livrés, stockés et utilisés en toute sécurité. Dans la station, le bâtiment acide est utilisé pour un stockage adéquat de l'acide sulfurique, il contient aussi des installations qui sont dédiées pour la préparation et injection de la solution d'acide sulfurique à l'eau brute. Les points d'injection sont installés dans la chambre de dissipation et les chambres de mélanges. Pour assurer ces différentes opérations le bâtiment est équipé :

- Des trémies contenant l'acide sulfurique,
- Cuves de préparation de la solution d'acide sulfurique,
- Pompes doseuses,
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.2.7 Mécanismes de traitement de l'eau**

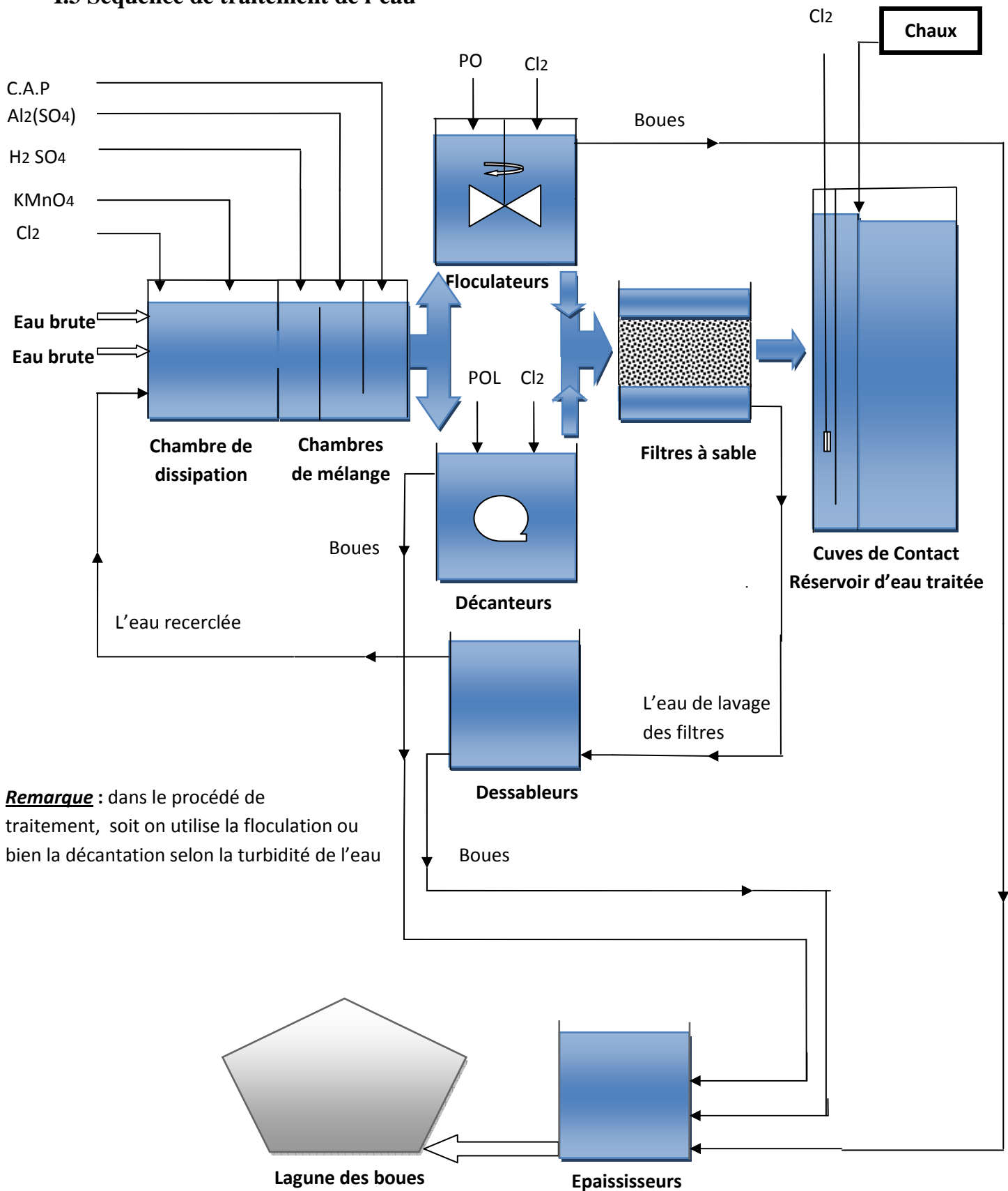
Le schéma synoptique de la figure I.1 montre tous les dispositifs utilisés dans les différentes étapes de traitement de l'eau brute et des boues engendrées. La succession et la localisation ces dispositifs sont prévues pour assurer un enchaînement de traitement permettant d'avoir une eau de bon qualité, afin de subir à la fin une dernière désinfection et une neutralisation pour être prête à la consommation. Concernant les boues, après leur épaissement elles seront dirigées vers la lagune de boues.

Le dispositif de traitement est composé de :

- Chambre de dissipation,
- Chambres de mélange,
- Décanteurs,
- Floculateurs,
- Filtres,
- Cuves de contacts et réservoir,
- Dessableurs,
- Epaisseur.

Dans ces différents éléments mentionnés sont installés des points d'injections des réactifs chimiques.

I.3 Séquence de traitement de l'eau



**Remarque :** dans le procédé de traitement, soit on utilise la floculation ou bien la décantation selon la turbidité de l'eau

Figure I.1 : Schéma simplifié des mécanismes de traitement de l'eau.

### I.3.1 Traitement de l'eau brute

Pour rendre l'eau potable, on lui applique des traitements variés qui obéissent tous au même principe : éliminer les éléments de matière contenus dans l'eau par étapes successives, jusqu'aux organismes microscopiques comme les virus et les microbes. Tout cela se fait selon les étapes suivantes :

#### I.3.1.1 Dissipation, mélange et répartition

L'eau brute provenant du barrage, mélangée au retour d'eau des dessableurs, est introduite par des déversoirs dans la chambre de dissipation représentée dans la figure I.2.



Figure I.2: chambre de dissipation.

Indice	Description
A	Déversoirs d'arrivée d'eau
B	Mesure de niveau ultrasonique
C	Analyseur de turbidité, conductivité et pH
D	Déversoir de trop plein

Son rôle principal est la tranquilliser le débit d'eau brute et assurer le mélange hydraulique des réactifs avec addition de permanganate, acide sulfurique, sulfate

d'aluminium et charbon actif en poudre. Ces réactifs sont dosés en fonction des besoins déterminés par le débit et la qualité de l'eau brute. Ensuite, l'ouvrage de répartition permet de diriger le débit soit :

- Vers les décanteurs, via les déversoirs de répartition, au niveau desquels du polymère est ajouté.
- Vers les flocculateurs et les filtres directement, via les canaux de by-pass des décanteurs.

### **I.3.1.2 Clarification**

Le débit d'eau brute sortant des chambres de mélange est dirigé soit vers les flocculateurs ou les décanteurs et cela selon la turbidité de l'eau ; si l'eau est limpide, elle sera dirigé vers les flocculateurs sinon elle passe par les décanteurs. L'objectif de cette opération est de clarifier l'eau brute, par séparation physique des Matières en Suspension (MES) présentes dans l'eau brute qui seront ensuite extraites de l'ouvrage et dirigées vers le traitement des boues.

Les MES de très petite taille (colloïdales) peuvent très difficilement décanter par l'action de la gravité seule, elles sont rassemblées en floc de taille plus importante par l'action de ces réactifs :

- Un coagulant (Sulfate d'Alumine) permet de neutraliser les forces de répulsion existantes entre les particules colloïdale, et ainsi de former des floccs.
- Un flocculant (Polymère) permet de créer des liaisons entre les floccs pour augmenter leur volume.

### **I.3.1.3 Filtration**

L'eau provenant des décanteurs ou des flocculateurs est répartie entre les 12 filtres où elle est filtrée gravitairement. Eventuellement, du chlore (inter-chloration) et du CAP auront été injectés dans l'eau clarifiée.

L'eau à filtrer passe à travers un lit filtrant constitué de sable, dont la hauteur de couche est importante et dépend du type de filtre. Les matières en suspension sont retenues dans les espaces intergranulaires, sur la plus grande partie de la hauteur de couche ; ensuite l'eau filtrée est collectée dans un canal et dirigée vers les cuves de contact de chlore.

Avant que le traitement ne se dégrade, les filtres subissent un cycle de lavage automatique pour éliminer les particules capturées, le lavage se fait à l'eau et à l'air, en contre-courant et la fréquence de ce lavage dépend principalement de la concentration en MES, du débit et de la nature et granulométrie du matériau filtrant ; Pendant la phase de lavage, la production d'eau filtrée est interrompue. A la fin du lavage, le filtre sera disponible pour la filtration.

L'eau de lavage, chargée, est collectée et dirigée vers le bassin d'équilibre et la filière de traitement des boues.

Pour les deux filières, l'eau et l'air pour le lavage ainsi que l'air comprimé nécessaires au procédé sont produits dans le bâtiment d'exploitation des filtres.

### **I.3.1.4 Désinfection et stockage d'eau traitée**

La désinfection finale de l'eau traitée est faite dans des cuves de contact, par l'injection de chlore; après l'eau passe dans le réservoir d'eau traitée. La chaux y est injectée pour contrôler le pouvoir corrosif de l'eau (neutraliser l'eau).

Le réservoir d'eau traitée permet de stocker l'eau avant sa distribution au réseau et aussi l'alimentation en eau de service de la station.

### I.3.2 Traitement des boues

Les eaux de lavage des filtres sont d'abord concentrées dans les dessableurs avant d'être mélangées aux boues extraites des décanteurs ou flocculateurs. Les boues sont ensuite épaissies dans les épaisseurs avant d'être pompées dans la lagune de stockage de boue.

### I.3.3 Préparation et dosage des réactifs

Les réactifs suivants sont préparés et dosés dans des bâtiments spécifiques, et ensuite ils seront injectés dans les différents points d'injection selon la nécessité de chaque étape de traitement.



Figure I.3 : Entrée des chambres de mélanges.

- **Sulfate d'alumine**

Le sulfate d'aluminium est essentiellement utilisé dans les stations municipales de traitement de l'eau potable et des eaux usées. Dans la station de TAKSEBT, le sulfate d'aluminium cristallisé  $Al_2(SO_4)_2$  est utilisé pour la coagulation des matières en suspension très fines et colloïdales contenues dans l'eau brute et éliminer les bactéries.

- **Permanganate de potassium**

Le permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ ) est principalement utilisé pour la précipitation du manganèse si la qualité de l'eau brute le demande, il peut également être utilisé pour le contrôle des charges organiques, en remplacement de la préchloration.

- **Acide sulfurique**

L'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) est utilisé dans le traitement de l'eau brute qui est souvent sujette à un ajustement du pH. C'est une Substance qui se dissocie plus ou moins complètement dans une solution aqueuse comme l'eau pour produire des ions hydrogène ( $\text{H}^+$ ) ainsi l'acide sulfurique est utilisé pour la diminution du pH de l'eau pour faciliter la coagulation.

- **Chaux**

La chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) est une poudre sèche fabriquée en hydratant la chaux vive avec suffisamment d'eau pour combler son affinité chimique avec l'eau, et ainsi on obtient le lait de chaux.

Le lait de chaux se classe en tête parmi les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau potable et de l'eau destinée aux industries. Elle est utilisée pour améliorer la qualité de l'eau et spécialement pour ajuster le ph (augmenté le ph) de l'eau et pour adoucir l'eau et éliminer l'arsenic.

- **Charbon actif en poudre (CAP)**

Il a une structure poreuse qui permet l'absorption d'une large gamme de composés et sa grande surface d'échange et ces propriétés d'absorption font de ce charbon activé un excellent choix pour l'amélioration du goût, la disparition des odeurs, la diminution du chlore, de l'ozone et de micropolluants comme pesticides et autres substances organiques dissoutes.

- **Polymère**

Le polymère est un floculant, permettant d'agréger les particules fines en floes de taille supérieure, plus facile à décanter. Le polymère est préparé pour des usages distincts :

- **Ligne eau**

Préparation et dosage pour injection dans les chambres de répartition et/ou dans les canaux de by-pass des décanteurs.

- **Ligne boues**

Préparation et dosage pour injection au dessableur et épaisseurs pour la formation de floes de boue afin d'améliorer la décantation.

- **Chlore**

Le chlore ( $\text{Cl}_2$ ) est l'un des réactifs les plus utilisés en désinfection, il a joué un rôle important dans le traitement de l'eau depuis des dizaines d'années. L'injection du chlore se fait en trois étapes :

- **Pré-chloration**

Elle permet d'obtenir une meilleure filtrabilité en aidant la coagulation, et une meilleure qualité de l'eau par la destruction des micro-organismes comme les bactéries.

- **Inter-chloration**

Cette étape a les mêmes objectifs que la pré-chloration avec en plus un effet désinfectant pour le media filtrant.

- **post-chloration**

C'est la dernière étape, elle a pour but, l'élimination des micro-organismes, de façon à répondre aux normes de qualité de l'eau traitée.

#### **I.4 Point sur la régulation du pH de l'eau**

Comme a été indiqué précédemment, la consigne sur le volume de lait de chaux à injecter est déterminée à l'aide d'un opérateur dans la salle de contrôle et de commande en se basant sur les résultats d'analyse faite sur l'eau. En effet un autre opérateur dans le laboratoire réalise une neutralisation sur un volume bien déterminé de l'eau en ajoutant des volumes précis de lait de chaux déjà préparé à une concentration requise. Une fois le pH désiré atteint, l'opérateur transmet la concentration de lait chaux préparé et le volume qu'il a injecté à l'opérateur de la salle de contrôle et de commande ; ensuite l'opérateur dans la salle se charge d'introduire ces valeurs dans le programme implémenté dans l'automate programmable du bâtiment chaux via l'écran de la supervision, et par un sous-programme de calcul il détermine le volume à injecter et enfin l'automate agit sur le procédé d'injection de lait de chaux.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, notre objectif principal consiste à élaborer une loi de commande qui va commander le procédé d'injection de lait de chaux pour que le volume injecté soit juste en fonction de la valeur du Ph de l'eau dans le réservoir, cette mesure est effectuée par un capteur qui est déjà installé. Cette commande permet d'améliorer considérablement le pH de l'eau, et aussi de réajuster le pH pour une valeur désiré.

**Conclusion**

Le défi du traitement de l'eau est de fournir une eau de haute qualité à prix abordable, tout en gérant tous les problèmes potentiels d'un approvisionnement donné et du système de traitement. Dans une séquence de traitement, chaque barrière est conçue pour protéger la qualité de l'eau, pour régler des problèmes de qualité particuliers ou à ces deux fins à la fois. Un système de traitement comportant plusieurs barrières règle plusieurs problèmes de qualité de l'eau, ce qui améliore le niveau de protection à chaque étape de traitement. Dans tout système de traitement, on trouve l'étape de neutralisation qui est réalisée par un procédé conçu à cette opération. Le procédé neutralisation de la station de traitement d'eau de TAKSEBT sera présenté est identifié dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE II**

*Etude et identification du procédé de  
neutralisation d'eau*

## **Introduction**

L'eau potable est soumise à un procédé de neutralisation destiné à réguler son pH. Pour ce faire un mécanisme a été conçu pour la préparation et le dosage de lait de chaux qui se classe en tête parmi les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau potable et de l'eau destinée aux industries.

Dans ce chapitre, on va d'abord présenter le procédé de neutralisation et son fonctionnement puis on passe à l'identification d'un modèle mathématique du procédé par la méthode.

## **II.1 Généralités sur le procédé de neutralisation de l'eau**

### **II.1.1 Potentiel Hydrogène (pH)**

Le pH, abréviation de "potentiel Hydrogène" est un indice qui traduit la concentration d'ions Hydrogènes dans une solution. Il détermine l'acidité, l'alcalinité ou la neutralité de l'eau. L'échelle qui sert à le mesurer est comprise entre 0 et 14. Toute eau est caractérisée par un pH d'équilibre ou de saturation (pHs). Si le pH est supérieur à ce pHs, l'eau est dite incrustante, s'il est inférieur, l'eau est dite agressive. Idéalement, le pH de l'eau doit être égale au Phs, elle est ni incrustante, ni agressive. Le pH d'une eau est directement lié à son origine et à la nature des terrains qu'elle traverse. Suivant sa valeur, il est parfois nécessaire de le rééquilibrer car le pH de l'eau peut avoir de nombreuses incidences sur d'autres paramètres ou systèmes ( par exemple les conduites d'eau).

Une eau incrustante précipite le calcaire et dépose une couche de calcaire sur les parois des conduites, jusqu'à éventuellement les obstruer partiellement. Une eau agressive attaque le calcaire en solubilisant les carbonates sous forme de bicarbonates. Elle est responsable de corrosion des conduites.

L'injection de lait de chaux permet de modifier les caractéristiques de l'eau de façon à ce que le pH soit aussi proche que possible du pHs ou légèrement supérieur. En pratique, l'injection de chaux sera réglée pour obtenir  $\text{pH} = \text{pHs} + 0,2$ .

### II.1.2 Le réactif utilisé pour la neutralisation

Le réactif utilisé est la chaux éteinte, ou chaux hydratée :  $(Ca(OH)_2)$ . Le produit est livré sous forme de poudre en vrac ou par sacs de 25kg à vider par la dessacheuse.

La chaux est préparée, sous forme de lait de chaux, et dosée dans le bâtiment chaux, ensuite le lait de chaux est injecté à la sortie de cuve de contact.

### II.1.3 Taux de traitement / Consommation journalière

Les dosages de lait de chaux estimés, au débit d'eau brute nominal sont résumés dans le tableau ci-après.

Moyen			Maximal		
$g/m^3$	Kg/h	Kg/j	$g/m^3$	Kg/h	Kg/j
10	252	6050	30	756	18150

## II.2 Elément constituant le procédé de neutralisation

### II.2.1 Poste de dépotage

Les sacs de chaux peuvent être déposés soit dans les dessacheuses puis vers les silos de stockage si le produit arrive dans des sacs, soit directement dans les silos de stockage si le produit arrive dans des camions vrac à l'aide d'un système de transport pneumatique.

### II.2.2 Dessacheuse

La dessacheuse représente la solution idéale pour extraire le contenu des sacs contenant de la chaux éteinte, dans un environnement caractérisé par la présence de poussière à l'extérieur.

### **II.2.3 Surpresseur**

Il existe dans le bâtiment deux surpresseurs, leurs objectifs est de permettre le transport pneumatique de la chaux vers les silos de stockage. Les surpresseurs sont équipés de détecteurs qui permettent d'identifier la connexion d'un flexible de transport pneumatique sur les conduites de remplissage de chaque cuve.

### **II.2.4 Silos de stockage**

Ceux sont 4 enceintes en béton de 200  $m^3$  de volume chacune, utilisées pour le stockage de la chaux éteintes, chaque silo est équipé des éléments suivants :

- Détecteurs de niveaux bas et haut,
- Dépoussiéreurs, placé au sommet du silo pour évacuer la poussière,
- Un dévouteur en partie inférieure conique, permet d'éliminer la formation de voutes empêchant l'écoulement de la chaux,
- Un doseur qui permet le soutirage d'un débit fixe de chaux.

### **II.2.5 Cuves de préparation**

Il existe 4 cuves de préparation (A, B, C et D), chacune est associée à un silo de chaux et ont un volume utile de 27  $m^3$ . Les injecteurs déversent la chaux sortant des doseurs dans ces cuves.

Chaque cuve est équipée des éléments suivants :

- Appareil de mesure de niveau ultrasonique dont la fonction est la mesure du niveau de lait de chaux dans chaque cuve,
- Agitateur utilisé pour assurer le mélange de l'eau et de la chaux,
- Vanne motorisée utilisée pour l'alimentation en eau de service de chaque cuve.

### **II.2.6 Pompes**

Le procédé de neutralisation contient plusieurs types de pompes, et chacune réalise une fonction distincte, et par conséquent la composition et le type d'une pompe est différent des autres. Dans ce qui suit, nous citerons ces différentes pompes, quant au rôle de chacune, il sera décrit dans le fonctionnement du procédé. Les différentes pompes sont :

- Pompe centrifuge,
- Pompe doseuse,
- Pompe de la boucle de soutirage,
- Pompe de dilution,
- Pompe vide-cave.

### **II.2.7 Vannes**

Dans le bâtiment chaux existe deux types de vannes, vannes manuelles et électrovannes, elles sont utilisées afin de permettre l'alimentation en différents liquides ou sa coupure pour les différents dispositifs utilisés dans le procédé, comme l'alimentation en eau de services des cuves de préparation...etc. ; les types et les rôles joués par vannes seront décrits dans le fonctionnement de procédé.

### **II.2.8 Instrumentation du procédé**

Le bâtiment est équipé de différents types d'instruments qui sont destinés à réaliser des fonctions bien spécifiques qui sont nécessaires pour le fonctionnement du procédé de neutralisation ; on trouve notamment :

- **Capteur de niveau ultrasonique**

On les utilise particulièrement pour la mesure du niveau de la préparation de lait de chaux dans chaque cuve de préparation.

- **Capteur de débit**

Ils sont utilisés pour la mesure des différents débits des liquides entrant et sortant du bâtiment chaud (l'eau de service et lait de chaud). Ils jouent un rôle très important dans le fonctionnement surtout pour la mesure de débit de l'eau de service alimentant les cuves pour la préparation de lait de chaud, à la concentration désirée, et la mesure de débit de lait de chaud injecté dans le réservoir d'eau traitée.

- **Détecteur de connexion**

Ils sont utilisés pour la vérification des différentes connexions effectuées entre les dispositifs du procédé, particulièrement ils permettent d'identifier la connexion du flexible de transport pneumatique sur les conduites de remplissage d'un silo et par conséquent, on peut identifier le silo qui est en remplissage.

- **Détecteur de pression**

Est un détecteur de pression haute, il est installé avec le surpresseur, il permet de détecter si la pression dans ce dernier est arrivée au niveau haut.

- **Détecteur fin de course (ouverture/fermeture)**

Chaque vanne installée dans le bâtiment est équipée de ce type de détecteur, ils permettent la détection de l'ouverture ou la fermeture de la vanne.

- **Détecteur de niveau (bas et haut)**

Les silos de stockage de la chaux sont tous équipés d'un détecteur de niveau pour la détection du niveau bas ou haut de remplissage du silo.

## **II.2.8 Armoires TBTF et TBTA**

Ces deux armoires sont installées dans une chambre séparée à l'intérieur du bâtiment chaud. La première c'est l'armoire de puissance (TBTF) qui contient les

éléments de puissances (relais, contacteurs...etc.) qui commandent l'alimentation en énergie électrique de tous les équipements du bâtiment, et la deuxième c'est l'armoire d'automate (TBTA) dans laquelle se trouve l'automate qui gère le procédé de neutralisation et ces accessoires.

### **II.3 Fonctionnement du procédé**

Le procédé est constitué de 2 filières identiques pour la préparation et le dosage du lait de chaux.

La chaux est chargée dans 4 silos (200 m<sup>3</sup> chacun) et diluée dans de l'eau de service. Le lait de chaux ainsi préparé est dosé par des pompes doseuses ensuite il est injecté dans les conduites de refoulement de pompes d'eau traitée, subissant une dilution secondaire, la solution de lait de chaux est injectée à la sortie des cuves de contact dans une zone de forte agitation hydraulique; de cette façon on assure un mélange optimal entre l'eau traitée et la solution de lait de chaux,

#### **II.3.1 Remplissage des silos de chaux**

Le remplissage des silos de stockage de la chaux peut se faire par deux façons, et cela en dépend de la manière du transport de la chaux.

##### **II.3.1.1 Remplissage par camion**

Le remplissage peut se faire directement par camion, l'opérateur connecte le flexible de dépotage du camion sur la conduite de remplissage de l'un des silos, lorsque l'opération commence, les équipements de dépoussiérage du silo se mettent en marche. Un détecteur identifie en supervision le silo en remplissage.

L'opérateur cesse l'alimentation lorsque le niveau max de remplissage d'un silo est atteint, il est indiqué par un capteur du niveau pour chaque silo (alarme en supervision et alarme locale au niveau du silo).

Le dépoussiéreur du silo s'arrête après une durée de fonctionnement T1 réglable en supervision, déclenché après déconnexion du flexible.

### **II.3.1.2 Remplissage pneumatique par sacs**

La chaux en sortie de la dessacheuse est injectée dans les conduites de refoulement du surpresseur, puis un opérateur place le commutateur sur « DEPOTAGE » pour le poste de remplissage à utiliser, ensuite il connecte le flexible d'alimentation pneumatique sur la conduite de remplissage de l'un des silos. Un détecteur identifie le silo en remplissage. Les équipements de dépoussiérage du silo se mettent en marche.

Si le niveau haut de remplissage des silos n'est pas atteint, un Surpresseur démarre, ainsi que le ventilateur associé. Le remplissage prend fin :

- Par demande de l'opérateur, qui place le commutateur sur « ARRET »,
- Si aucun nouveau sac n'est détecté pendant une période déterminée T2,
- Sur détection du niveau haut du silo en remplissage.

### **II.3.1.3 Vidange de la dessacheuse**

Cette opération permet de vider la chaux déjà présente dans la trémie de la dessacheuse, sans ajouter des sacs. L'opérateur connecte le flexible d'alimentation pneumatique sur la conduite de remplissage de l'un des silos, un détecteur identifie le silo en remplissage et le dépoussiéreur du silo démarre ; ensuite l'opérateur place le commutateur sur « VIDANGE » pour le poste de remplissage qu'il va utiliser (A ou B). Le remplissage prend fin :

- Par demande de l'opérateur, qui place le commutateur sur « ARRET »,
- Sur détection du niveau haut du silo en remplissage.

### **II.3.2 Préparation de la solution lait de chaux**

La préparation est décrite pour un silo et la cuve A. La séquence est identique pour les cuves B, C, D comme présenter dans la figure1.

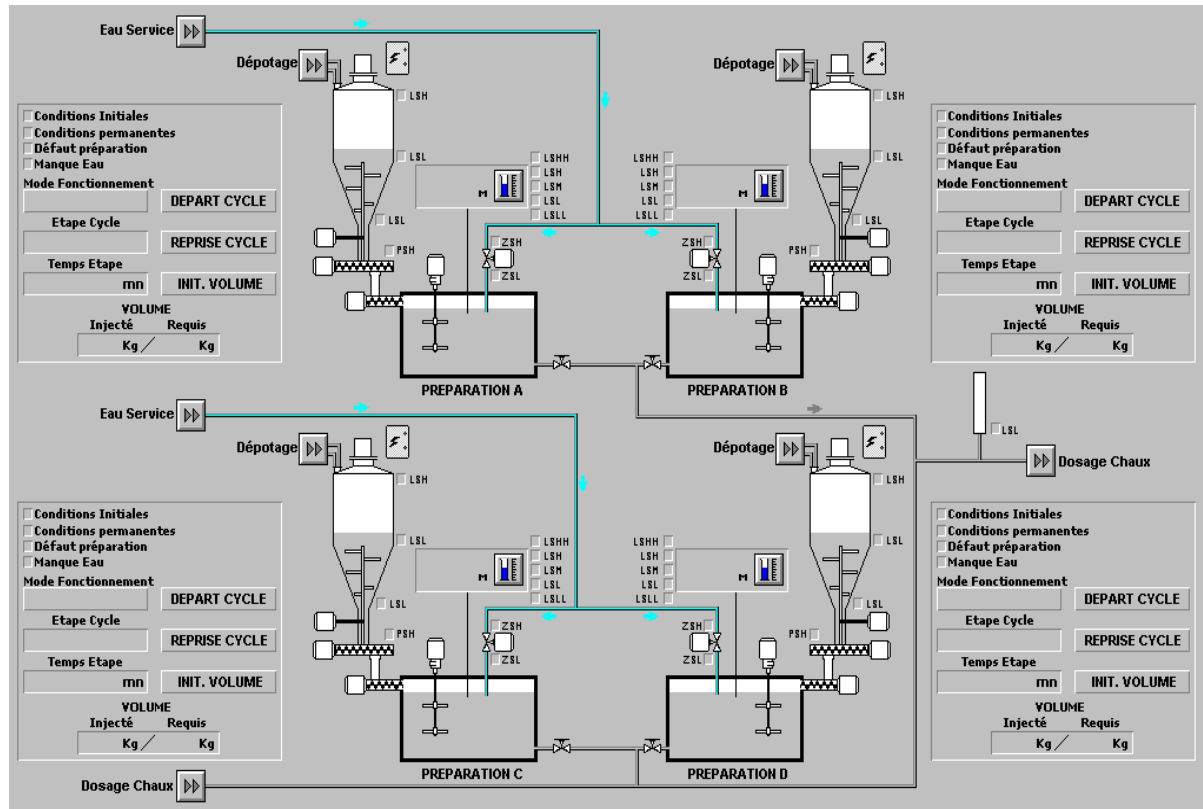


Figure II.1 : Vue en supervision de processus de préparation de lait de chaux.

Les conditions suivantes doivent être remplies pour préparer une bâchée automatiquement :

- Pas de défaut sur les équipements de préparation,
- Le niveau de chaux dans le silo correspondant est au-dessus du niveau bas,
- La cuve est quasiment vide, information indiquée par un capteur de niveau,
- Le mode de fonctionnement doit être AUTO.

L'opérateur renseigne en supervision la concentration  $C$  (en g/L) de la préparation. La quantité requise  $M_{req}$  de chaux à ajouter est calculée en fonction du volume utile de la cuve  $V$  en L, entré en supervision :

$$M_{req} \text{ (kg)} = C \times V / 1000$$

L'opérateur déclenche la séquence de préparation en supervision via le bouton-poussoir « DEPART CYCLE » ou « REPRISE CYCLE » si une séquence précédente a été interrompue. Le fonctionnement se fait selon les étapes suivantes:

- La vanne d'eau traitée s'ouvre,
- Le soutirage de la chaux démarre avec le démarrage des équipements associés :
  - Injecteur,
  - Doseur,
  - Dévouteur.
- Le volume de chaux ajouté est initialisé,
- Arrêt du dévouteur et du doseur lorsque la quantité requise atteinte,
- Arrêt de l'injecteur après le temps de purge, pour vider l'injecteur,
- La vanne d'eau reste ouverte jusqu'à ce que le niveau atteigne le seuil max de la cuve (la vanne et l'élément de mesure de niveau sont présentés dans la figure II.2),
- La cuve est disponible pour le dosage.

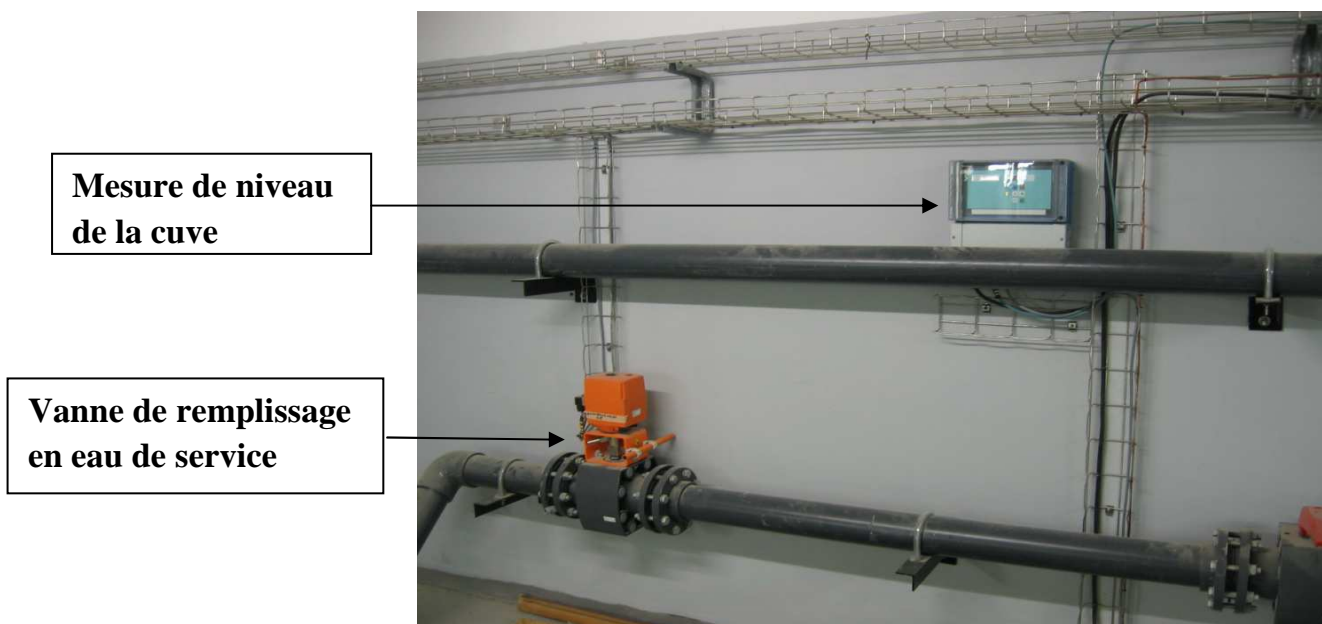


Figure II.2 : Instruments utilisés dans la préparation de lait de chaux.

L'agitateur de la cuve fonctionne en permanence tant que le niveau de la solution dans la cuve est supérieur au seuil.

### II.3.3 Dosage de lait de chaux

Afin d'éviter la prise en masse de la chaux dans les conduites, il est nécessaire d'assurer en permanence une vitesse suffisante dans les conduites, pour cette raison, les pompes doseuses soutirent dans une boucle quasi-fermée.

Le lait de chaux est aspiré dans la cuve de répartition par des pompes centrifuges qui mettent la boucle en mouvement, ensuite la quantité nécessaire est soutirée par les pompes doseuses et le reste du lait de chaux est réinjecté dans la cuve.

#### II.3.3.1 Schéma général d'un poste de dosage

Le schéma synoptique du poste de dosage est donné par la figure II.3. Il est composé de :

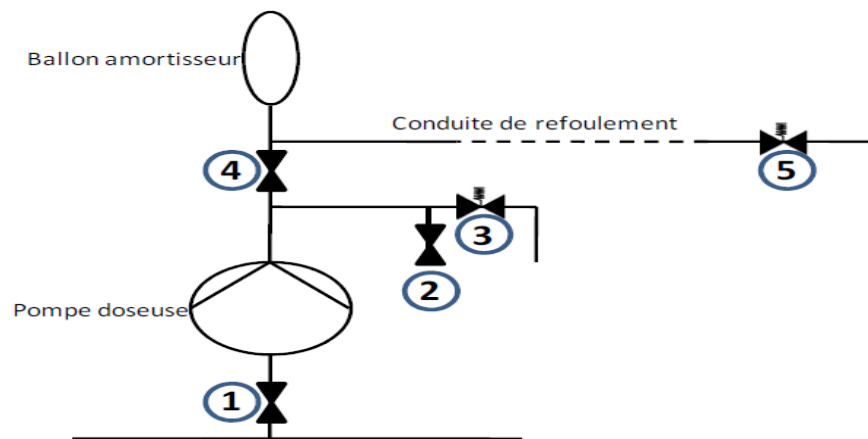


Figure II.3 : Schéma général d'un poste de dosage.

- La vanne d'isolement en aspiration (1) est ouverte pour permettre l'alimentation de la pompe,
- La vanne (2) permet la vidange de la conduite de refoulement ainsi que l'amorçage de la pompe lorsque la conduite de refoulement est vide,
- La vanne (3) permet l'évacuation de lait de chaux,

- La vanne (4) permet l'isolement de la pompe au refoulement,
- La soupape de sécurité (5) s'ouvre pour protéger la pompe contre une surpression due à un bouclage ou une vanne sur la conduite de refoulement.

Le débit de la pompe est pulsé (phases successives de refoulement et d'aspiration) et le ballon amortisseur a pour rôle d'amortir ces pulsations, sur la conduite de refoulement, en bout de ligne, la soupape (5) permet d'assurer une pression de 3 bars sur toute la conduite de refoulement, si cette surpression n'était pas présente, le liquide pourrait passer gravitairement par la pompe, à un débit non contrôlé. A ce schéma simplifié s'ajoutent différentes vannes permettant la vidange et le rinçage du système.

Dans la salle contenant les 6 pompes doseuses existantes est installé une autre pompe appelée vide-cave pour l'assèchement de cette salle afin de protéger ces pompes et les autres dispositifs existants.

### II.3.3.2 Réglage du dosage

Les pompes doseuses A, B et C sont affectées à la filière (1) et D, E, F à la filière (2). Le débit de lait de chaux est asservi au débit d'eau filtrée, avec un taux de traitement défini en supervision pour chaque filière. La quantité de chaux ajoutée est déterminée par le temps de marche et le débit du doseur :

- Le débit du doseur  $Q_d$  en kg/h est renseigné en supervision,
- Après un temps de marche  $t$  en s la quantité injectée est :

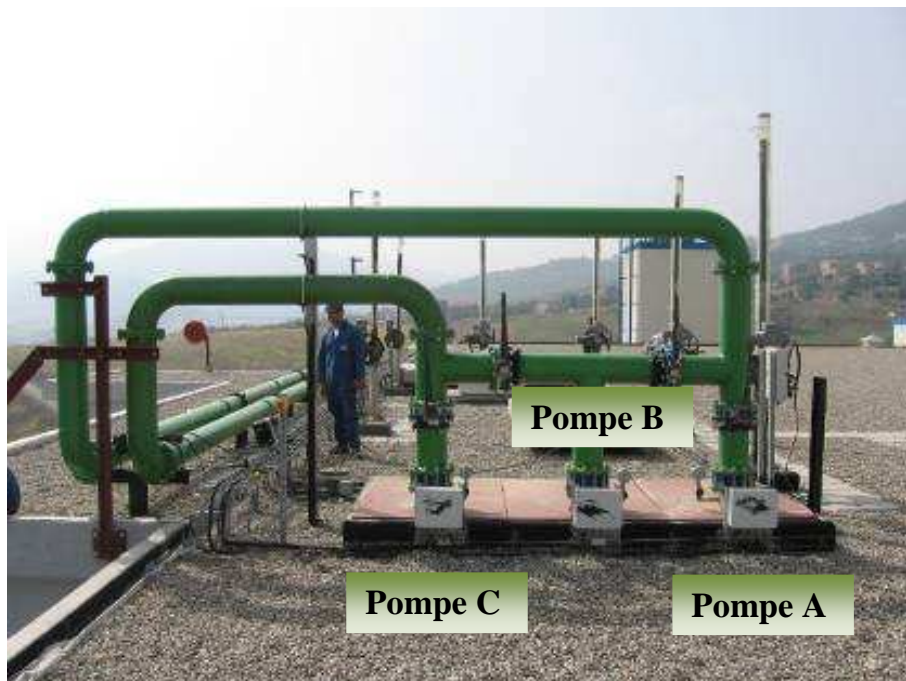
$$M_t = Q_d \cdot \frac{t}{3600} \quad \text{en kg}$$

- Le soutirage de chaux est terminé lorsque la quantité injectée atteint la quantité requise.

Pour la vérification régulière du débit des pompes doseuses, où s'il y a un doute sur le débit réel d'une pompe, son débit pourra être contrôlé à l'aide des cylindres de calibration prévus à cet effet.

### II.3.4 Dilution de lait de chaux

Trois pompes de dilution A, B, C de chaux (figure II.4) prélèvent l'eau de la chambre de sortie pour diluer la chaux dosée.



**Figure II.4 : Pompes de dilution.**

La pompe A est dédiée à la filière 1 et la pompe C à la filière 2, la pompe B pouvant être utilisée pour les deux filières, après manipulation des vannes et sélection en supervision.

La pompe de dilution de chaux affectée à chaque filière démarre quand une demande de dosage est faite pour la filière. Le débit d'eau de dilution est mesuré par un débitmètre électromagnétique pour chaque filière (figure II.5). Si ce débit devient

inférieur au seuil fixé en supervision, alors que la pompe fonctionne, une alarme est déclenchée, pour alerter l'opérateur d'un éventuel dysfonctionnement des pompes.

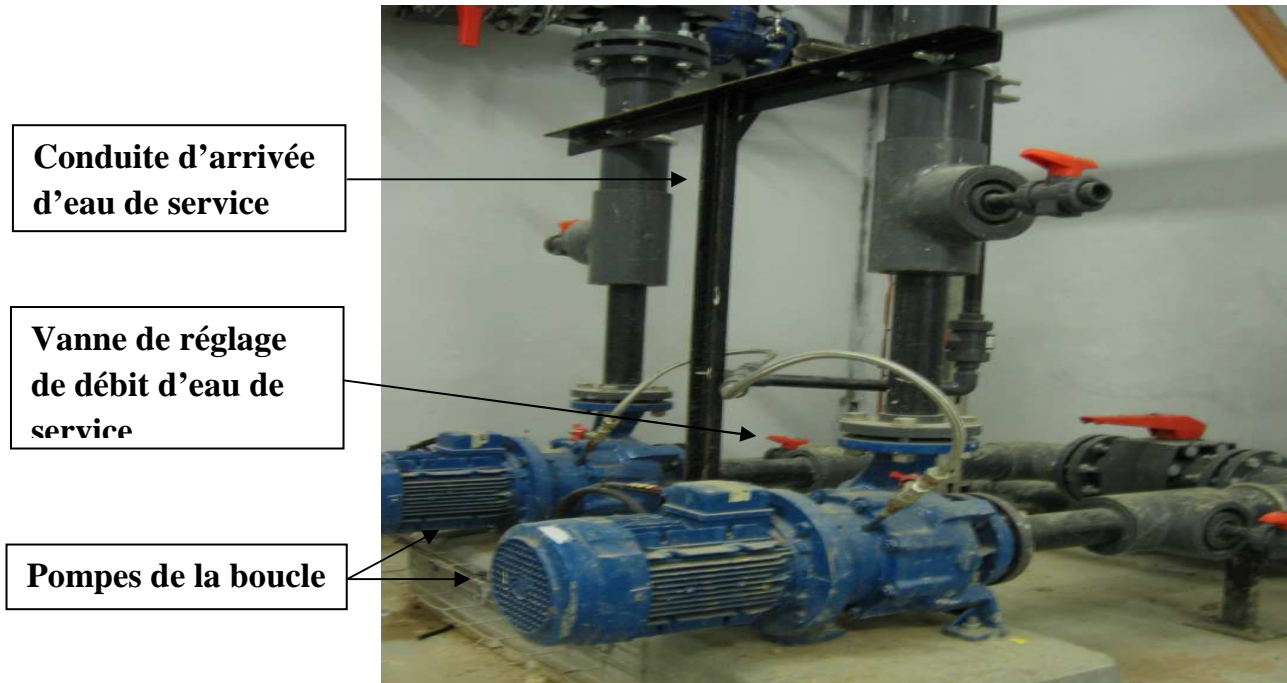


**Figure II.5 : Débitmètres de dilution de chaux filière 1/ filière 2.**

Le débit de chaux diluée pour chaque filière est déversé dans une goulotte située au dessus du déversoir de sortie des cuves de contact, légèrement en amont. La goulotte couvre la longueur du déversoir et est percée régulièrement d'ouverture latérales, afin d'assurer une bonne répartition du débit sur toute la longueur du déversoir.

### **II.3.5 Boucle de soutirage**

Comme le montre la figure II.6, la boucle de soutirage contient 2 pompes qui dirigent la chaux diluée avec l'eau de service vers la sortie des cuves de contact, ainsi que l'alimentation en eau de service de la garniture mécanique (tuyauteries, pompes...) qui est indispensable en permanence. Cette alimentation est contrôlée par des vannes manuelles.



**Figure II.6 : Composants de la boucle de soutirage.**

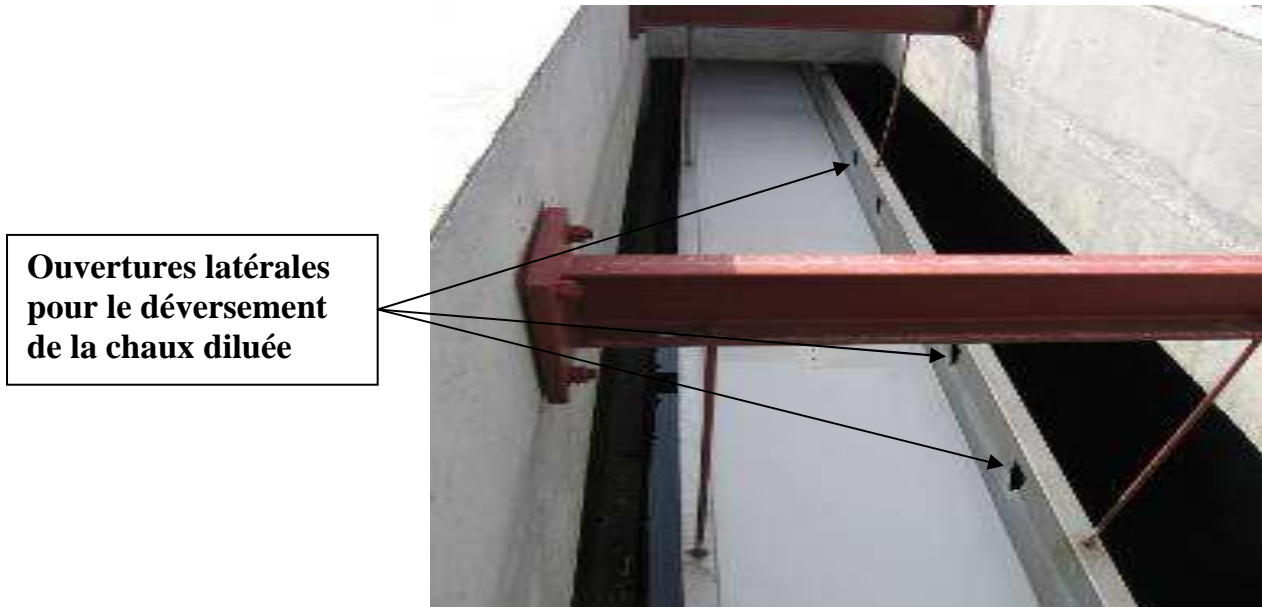
Une seule des deux pompes doit être en mode automatique (AUTO), la deuxième étant à l'arrêt, sa vanne d'isolement au refoulement fermée, la pompe disponible en AUTO démarre lorsque l'injection de lait de chaux est demandée pour une filière ou les deux. A l'arrêt du pompage, il est nécessaire de fermer la vanne d'arrivée d'eau de service.

La marche des pompes n'est pas autorisée si le détecteur de niveaux, dans les cuves de rétention de chaque pompe, détecte une fuite éventuelle, ou si le détecteur de débit placé sur la ligne commune d'alimentation en eau de service ne détecte pas de débit.

### **II.3.6 Injection de lait de chaux diluée**

L'opérateur demande l'injection de chaux, pour chaque filière, par un commutateur « AVEC LAIT DE CHAUX ». Le débit de chaux diluée pour chaque filière est déversé dans une goulotte située au dessus du déversoir de sortie des cuves de contact (figure II.7), légèrement en amont. La goulotte couvre la longueur du

déversoir et est percée régulièrement d'ouverture latérales, afin d'assurer une bonne répartition du débit sur toute la longueur du déversoir.



**Figure II.7 : Goulotte de déversement de la chaux diluée.**

## **II.4 Identification du procédé de neutralisation**

Pour décrire le comportement dynamique du procédé, nous avons procédé par une expérience dans le laboratoire d'analyse de la station pour l'identifier un modèle mathématique pour le procédé de neutralisation.

Il s'agit donc d'appliquer des protocoles d'essai significatifs, sensibilisant les paramètres du modèle. C'est l'opération cruciale du projet, car elle nécessite beaucoup d'attention.

### **II.4.1 Expérience réalisée**

Notre expérience consiste à relever les valeurs du pH de l'eau chaque deux secondes après injection de lait de chaux, et pour cela nous avons pris un litre (1L) d'eau dans un Bicher et lui injecte un volume de 200 ml du lait de chaux, d'une concentration de 10 mg/l préalablement préparée, et à l'aide d'un Ph-mètre et d'un

chronomètre nous avons pris les mesures, simultanément du Ph de l'eau et du temps lui correspond.

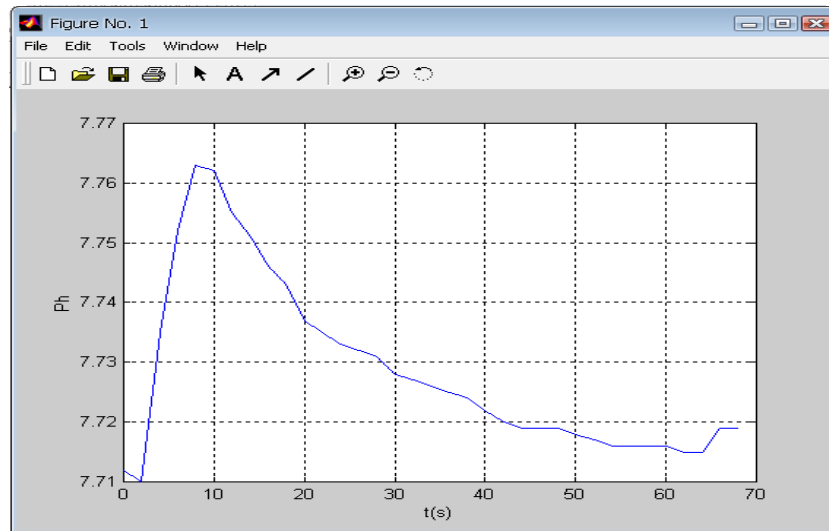
Notons que l'expérience a été réalisée manuellement, et nécessité beaucoup de précision, à cet effet nous avons fait le mieux possible pour réunir les conditions idéales acquérir des mesures fiables.

#### **II.4.2 Résultats obtenus**

Les valeurs du pH que nous avons obtenu en fonction du temps sont résumées dans le tableau suivant :

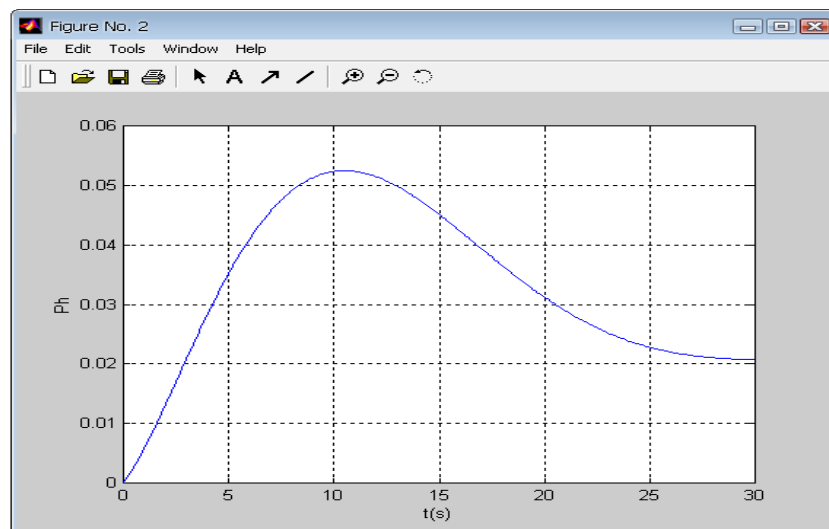
<b>Temps (S)</b>	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
<b>pH</b>	7.712	7.710	7.735	7.752	7.763	7.762	7.755	7.751	7.746	7.743
<b>Temps (S)</b>	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
<b>pH</b>	7.737	7.735	7.733	7.732	7.731	7.728	7.727	7.726	7.725	7.724
<b>Temps (S)</b>	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
<b>pH</b>	7.722	7.720	7.719	7.719	7.719	7.718	7.717	7.716	7.716	7.716
<b>Temps (S)</b>	60	62	64	66	68					
<b>pH</b>	7.715	7.715	7.715	7.719	7.719					

- L'évolution du pH en fonction du temps est donnée par la Figure II.8.



**Figure II.8 : Courbe réel de variation du pH en fonction du temps.**

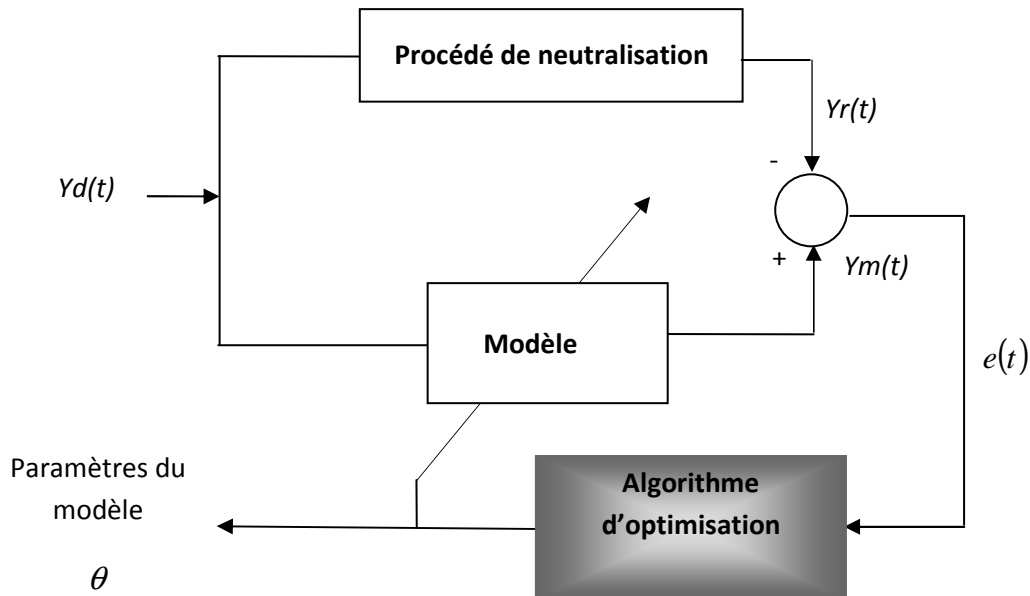
On remarque que la courbe obtenue ne permet pas de déduire la nature de notre système (système 1<sup>er</sup> ordre, 2<sup>ème</sup> ordre ou...etc) et pour ce faire, on a procédé au lissage des résultats afin d'avoir une courbe exploitable pour l'identification tout en ramenant les conditions initiales à zéro. Le résultat obtenu est donné par la Figure II.9, on constate que l'évolution du pH est proche de celle d'un élément du deuxième ordre oscillatoire.



**Figure II.9 : Courbe obtenu après le lissage.**

### II.4.3 Identification par la méthode du modèle

Pour identifier le modèle du procédé de neutralisation, on procède par la méthode du modèle schématisé sur la Figure II.10, en considérant les mesures obtenues après l'opération de lissage, il s'agit de minimiser l'erreur entre la sortie réelle du procédé (sortie mesurée) et celle estimée par le modèle.



**Figure II.10 : Estimation des paramètres du procédé de neutralisation.**

L'identification du modèle du procédé revient à rechercher les paramètres du modèle minimisant l'écart observé entre la sortie mesurée et celle prédite par le modèle.

La première étape consiste à choisir d'abord une structure pour le modèle du procédé. Ainsi, d'après le tracé de l'évolution de la sortie du procédé pour une entrée échelon, on constate que la réponse est oscillatoire, par conséquent la dynamique du procédé peut être décrite par un modèle de second ordre, c'est-à-dire :

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

Où  $\xi$  est le facteur d'amortissement,  $\omega_n$  est la pulsation naturelle du système et  $k$  est le gain.

Ainsi, pour identifier le modèle, on va minimiser l'écart suivant :

$$e(t) = y_m(t) - y_r(t) \quad (2)$$

Cela revient à considérer le critère suivant :

$$J = \int_0^{+\infty} e^2(t) dt \quad (3)$$

$Y_m$  représente les mesures obtenus à des instants d'échantillonnage, et  $y(t)$  représente la sortie du modèle échantillonné, c'est-à-dire pour une entrée du type échelon et dans le cas d'un système oscillatoire, la sortie du système (1) est donnée par l'expression suivante :

$$y_r(t) = k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot e^{(-\xi \cdot \omega_n \cdot t - \text{mes}) \cdot \sin((\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}) \cdot t - \text{mes}) + \arccos(\xi))} \quad (4)$$

Par la suite on peut définir le problème d'optimisation suivant :

$$\min_{K, \omega_n, \xi} J(K, \omega_n, \xi) = \min_{K, \omega_n, \xi} \int_0^{+\infty} \left( y_m(t) - k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot e^{(-\xi \cdot \omega_n \cdot t - \text{mes}) \cdot \sin((\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}) \cdot t - \text{mes}) + \arccos(\xi))} \right) dt \quad (5)$$

Comme les mesures sont prises à des instants bien déterminées  $t_k = k\Delta t$ , alors le problème (5), devient :

$$\min_{K, \omega_n, \xi} J(K, \omega_n, \xi) = \min_{K, \omega_n, \xi} \sum_{k=0}^N \left( y_m(k) - k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot k\Delta t - \text{mes} \cdot \sin((\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}) \cdot k\Delta t - \text{mes}) + \arccos(\xi))} \right) \quad (6)$$

Ce problème d'optimisation non linéaire peut être résolu numériquement par un algorithme d'optimisation numérique en considérant une estimée de départ pour les paramètres du modèle. Dans notre cas on utilise une version de la méthode de quasi-Newton.

Pour cela un programme Matlab a été élaboré pour chercher la solution du problème d'optimisation (6). Les paramètres obtenus sont :  $k$ ,  $\omega_n$ , et  $\zeta$

Par la suite le modèle du procédé de neutralisation est :

$$G(s) = \frac{0.03446}{13.83s^2 + 1.231s + 1} \quad (7)$$

Pour valider le résultat obtenu, la sortie prédite par le modèle obtenu, et les mesures obtenues par l'opération de lissage sont représentées sur la Figure II.11. D'après les résultats obtenus, on remarque que le modèle identifié régit convenablement la dynamique du procédé mais présente un léger écart par rapport aux mesures réelles. Par conséquent, une technique de commande robuste par rapport aux erreurs de modélisation est indispensable.

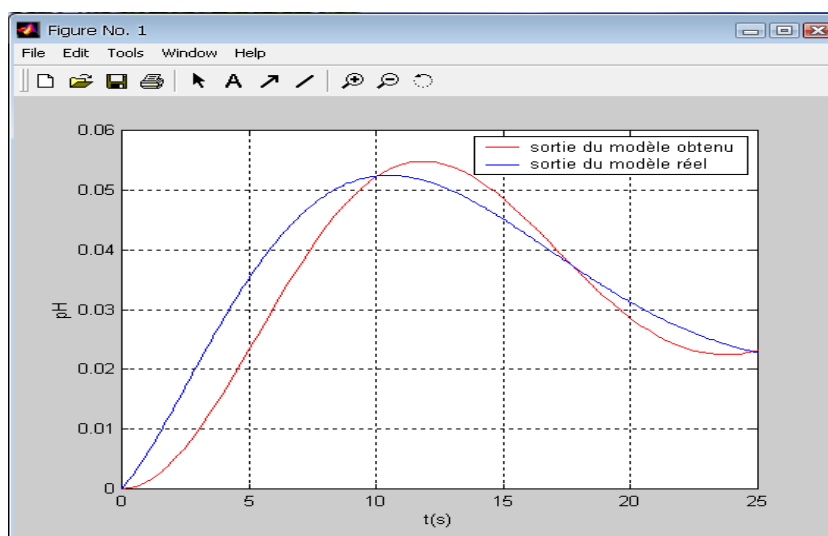


Figure II.11 : Courbes de sorties des deux modèles.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, une présentation générale de procédé de neutralisation de la station de traitement de TAKSEBT a été faite en présentant ces différents constituants, son fonctionnement et son identification. L'opération de neutralisation au sein de la station de traitement de TAKSEBT est réalisée par un opérateur. Cette opération peut être facilement automatisée en utilisant une boucle de régulation introduisant une loi de commande par moderne de nature numérique. Parmi les lois de commande modernes, on retrouve la commande par modèle interne réputée robuste aux erreurs de modélisation. Cette dernière sera adoptée dans la présente étude pour la régulation du Ph. La présentation détaillée de cette stratégie de commande fera l'objet du chapitre suivant.

# **CHAPITRE III**

*Commande à modèle interne du procédé  
de neutralisation*

## **Introduction**

Dans ce présent chapitre nous allons présenter la méthode de synthèse d'un régulateur à modèle interne et ses différentes caractéristiques. Cette méthode sera appliquée pour la détermination d'un régulateur à modèle interne pour le procédé réel de neutralisation, ensuite une simulation du ce régulateur sera effectuée afin de vérifier son efficacité et évaluer ces performances.

Après la détermination du régulateur qui correspond mieux à notre procédé, on va présenter les différents éléments de la boucle de régulation.

### **III.1 Régulateur à modèle interne**

La commande à modèle interne est l'une des méthodes recommandées pour l'obtention des performances désirées pour les systèmes asservis en présence de perturbations et des erreurs de modélisation.

Dans cette, on va présenter le correcteur à modèle interne que ses propriétés de robustesse le rendent très intéressant d'un point de vue pratique. Après une introduction exposant les avantages de ce type de correcteur, nous développons son principe et donnons quelques-unes des ses propriétés.

#### **III.1.1 Présentation et avantages du régulateur**

Lorsque le classique régulateur PID ne permet d'obtenir les performances désirées et qu'on ne dispose pas d'une puissance de calcul importante pour implanter une régulation prédictive standard, le régulateur à modèle interne ou CMI (Contrôle à Modèle Interne) s'avère être une approche intéressante.

En effet, ce type de correcteur est robuste, facile à régler en ligne et facile à maintenir c'est-à-dire à faire évoluer avec le procédé, car il contient un modèle explicite du procédé à commander ; De plus, une méthodologie de synthèse de ce correcteur a été développée ce qui rend la conception une démarche simple.

L'intérêt de l'approche CMI, est de montrer comment on peut réaliser un compromis performance/robustesse en fonction de l'incertitude des paramètres du modèle.

Pour des systèmes plus complexes, pour lesquels le correcteur PID équivalent n'existe pas, la synthèse d'une commande à modèle interne fournit un correcteur simple, offrant de bonnes performances, et pour lequel, la aussi, le compromis performance/robustesse peut être facilement choisi. On peut même imaginer de l'ajuster en ligne grâce à un paramètre de conception.

Nous présenterons ici la version discrète de l'approche CMI qui est appropriée pour notre projet, car la loi de commande sera implémentée sur un automate programmable, c'est-à-dire sous la forme discrète. L'approche continue est équivalente.

## III.2 Principe de la commande à modèle interne

### III.2.1 Présentation intuitive de la structure CMI

Le principe d'une régulation classique est donné par cette figure III.1:

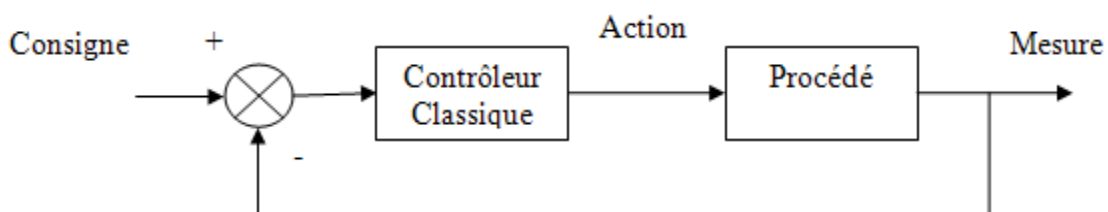
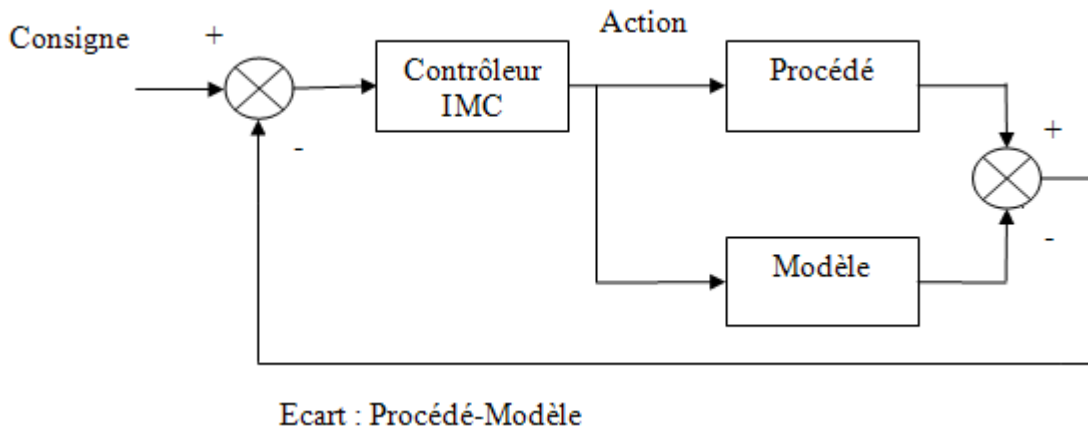


Figure III.1 : principe d'une régulation classique.

Et la structure du correcteur à modèle interne est donnée par cette figure:



**Figure III.2 : principe du correcteur à modèle interne.**

Dans la structure à modèle interne, la partie régulation est composée de deux parties.

- Le régulateur proprement dit,
- Le modèle du procédé.

Cette structure est à comparer à la structure classique. Dans la structure à modèle interne, l'effet des variables manipulées est soustrait de la sortie du procédé. Si l'on suppose que le modèle est parfait et que le système n'est soumis à aucune perturbation, alors le signal feedback, écart entre la sortie du procédé et celle du modèle, est identiquement nul.

Dans le cas du modèle parfait cet écart est égal aux perturbations. Dans le cadre de cette hypothèse du modèle parfait, le système peut être considéré comme étant en boucle ouverte et par conséquent :

- Les problèmes de stabilité rencontrés dans les boucles classiques disparaissent. Dans la suite on démontre que le système bouclé est stable si

et seulement si le procédé et le correcteur CMI sont stables.

- Le rôle du correcteur est donc en quelque sorte d'inverser le modèle. En d'autres termes, le contrôleur CMI peut être vu comme un régulateur feedforward (par anticipation) en boucle ouverte et être calculé comme tel. Cependant, il n'a pas les inconvénients d'une boucle ouverte pure car le signal feedback, qui est égal à l'écart modèle procédé c'est-à-dire aux perturbations, permet de modifier le point de consigne de façon adéquate.

Lorsque le modèle ne permet de modéliser le procédé de façon parfaite le signal de feedback est dû à la fois aux perturbations et aux erreurs du modèle.

Celles-ci donnent lieu à un feedback au sens classique et des problèmes de stabilité peuvent se poser. On doit alors corriger le contrôleur feedforward idéal pour obtenir une certaine robustesse vis-à-vis des erreurs du modèle.

### III.2.2 Propriétés de la structure IMC

Le schéma bloc d'une régulation classique est donné par figure III.3 :

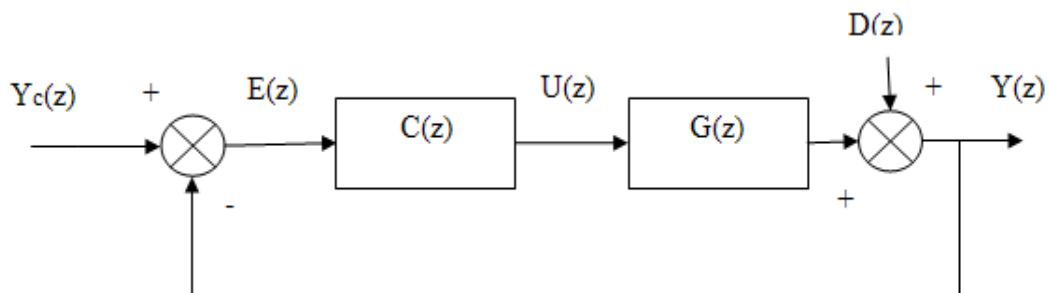
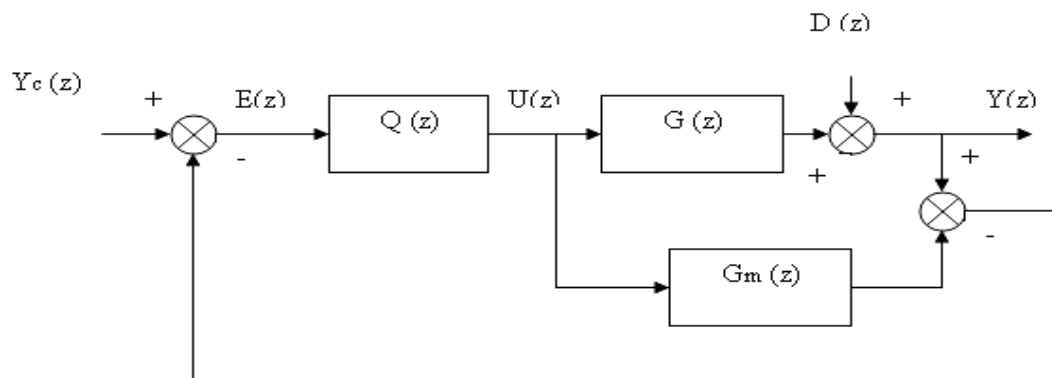


Figure III.3: Schéma bloc d'une régulation classique.

Et celui de la régulation à modèle interne :



**Figure III.4: Schéma bloc d'une régulation à modèle interne.**

Considérons le schéma bloc de la Figure (III.4), le transfert entre la consigne et la variable contrôlée peut s'obtenir de la façon suivante :

$$E(Z) = Y_c(z) - (GQ E(Z) - G_m Q E(Z)) + D(Z) \quad (1)$$

$$Y(Z) = GQ E(Z) + D(z) \quad (2)$$

Soit :

$$E(z) = \frac{1}{1+Q(G-G_m)} (Y_c(z) - D(z)) \quad (3)$$

$$Y(z) = \frac{QG}{1+Q(G-G_m)} (Y_c(z) - D(z)) + D(z) \quad (4)$$

Ou encore :

$$Y(z) = \frac{QG}{1+Q(G-G_m)} Y_c(z) + \frac{1-QG_m}{1+Q(G-G_m)} D(z) \quad (5)$$

Rappelons que dans le cas d'une boucle classique, on avait :

$$Y(z) = \frac{cG}{1+cG} Y_c(z) + \frac{1}{1+cG} D(z) \quad (6)$$

A partir de ces relations, il est facile d'établir les correspondances entre la fonction de transfert du régulateur classique  $C(z)$  et celle du régulateur à modèle interne  $Q(z)$  :

$$C = \frac{Q}{1-G_m Q} \quad (7)$$

$$Q = \frac{C}{1+G_m C} \quad (8)$$

Par conséquent, les performances qui peuvent être obtenues avec un régulateur à modèle interne ne sont, à priori, ni meilleurs, ni moins bonnes que celles qui peuvent être obtenues avec une structure classique, puisque, comme le montrent les relations (7) et (8), ces structures sont équivalentes. L'intérêt de la structure à modèle interne réside, comme nous allons le voir, dans sa simplicité de conception et de mise en œuvre.

Examinons maintenant les transferts dans le cas où le modèle est parfait, c'est-à-dire  $G_m = G$ , on a :

$$Y(z) = QG Y_c(z) + (1 - QG)D(z) \quad (9)$$

Le système peut être vu comme étant en boucle ouverte. Par conséquent, la stabilité de l'ensemble procédé plus régulateur à modèle interne peut être déduite des fonctions de transfert de  $G$  et  $Q$ . On peut énoncer le résultat suivant :

- Si  $G$  est stable et si le modèle est parfait  $G_m = G$ , alors le système contrôlé par la structure à modèle interne est stable si et seulement si le régulateur  $Q$  est stable.

Ce résultat est à comparer à ce qu'on a pour une structure classique, où il n'est pas évident de déduire les propriétés de stabilité du système contrôlé en boucle fermée à partir du régulateur  $C$ .

Par ailleurs, la relation (8) est intéressante à considérer lors de la conception du régulateur à modèle interne  $Q$ . Elle fait apparaître clairement son aspect feedforward.

### III.3 Méthodologie de synthèse du régulateur

#### III.3.1 Principe de l'approche

Compte tenu des propriétés de la structure CMI, la synthèse d'un régulateur se réalise en deux étapes :

a) On fait l'hypothèse que le modèle est parfait. Dans ce cas, la synthèse du régulateur se réduit à la sélection d'un régulateur  $Q_0$  qui satisfait les performances spécifiées en boucle fermée puisque la stabilité globale est automatiquement assurée. Les critères de performance que l'on peut considérer sont :

- La minimisation de la somme du carré des erreurs entre la consigne et la variable contrôlée.
- Un temps de réponse donné.
- Pas de dépassement excessif.
- Pas de sollicitation excessive de la variable manipulée.
- Une erreur statique nulle pour des consignes en échelon ou en rampe.

b) Pour prendre en compte le fait que le modèle n'est pas parfait, le régulateur final est pris égal au régulateur idéal  $Q_0$  augmenté un filtre passe bas (en général de premier ordre), dont les paramètres (en général un seul) sont ajustés en ligne ou hors ligne pour réduire l'action sur la variable manipulée et augmenter la robustesse du contrôleur aux erreurs du modèle.

### III.3.2 Synthèse de $Q_0$

Celle-ci est réalisée dans le cas où le modèle est parfait à partir de l'équation (8). L'idée est d'inverser la partie inversible du modèle du système. Pour se faire, la fonction de transfert est factorisée de façon à faire apparaître une partie non inversible. Ainsi, le modèle du système est factorisé comme suit :

$$G_m(z) = G_I(z) \cdot G_{NI}(z) \quad (10)$$

En particulier, la partie  $G_{NI}$  contient les retards et les zéros instables. La partie  $G_I$  est par définition inversible. Par conséquent, le contrôleur est donné par :

$$Q_0(z) = G^{-1}(z) \quad (11)$$

La réponse en boucle fermée du système est alors égale à :

$$Y(z) = G_{NI}(z) \cdot y_c(z) + (1 - G_{NI}(z)) \cdot D(z) \quad (12)$$

La fonction de transfert en boucle fermée représente donc la partie non inversible du modèle du système.

### III.3.3 Synthèse du filtre F

Le filtre  $F(z)$  est ajouté de façon à robustifier le système en boucle fermée vis-à-vis des erreurs de modèle. Celui-ci est souvent pris du premier ordre :

$$F(z) = \frac{(1-\alpha)z}{z-\alpha} \quad \text{avec} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (13)$$

Le filtre est ajouté à la sortie du régulateur et modifie la variable manipulée comme suit :

$$u_f(k) = \alpha u_f(k-1) + (1-\alpha)u_f(k) \quad (14)$$

Ses variations seront d'autant plus atténuées que la constante  $\alpha$  se rapproche de la valeur 1.

La réponse du système en boucle fermée avec le filtre s'écrit :

$$Y(z) = G_{NI}(z) \cdot f(z) \cdot y_c(z) + (1 - G_{NI}(z) \cdot f(z)) \cdot D(z) \quad (15)$$

Il apparaît donc que le filtre modifie la réponse en boucle fermée. Dans le cas de modèle parfait, il n'a pas d'effet sur la stabilité du système. En d'autre thème, si le régulateur nominal  $Q(z)$  est instable, il est important de noter que l'augmentation de la constant de filtre aura pour effet de ralentir le système, mais pas de le stabiliser.

Dans le cas d'un modèle imparfait, le filtre  $F(z)$  est utile pour compenser les erreurs de modèle, et donc pour améliorer la robustesse de la boucle de régulation. En effet, dans ce cas le transfert du système en boucle fermée s'écrit :

$$Y(z) = \frac{G^{-1}(z)_{NI}F(z)}{1+[(G-G_m)G^{-1}(z)_m]G^{-1}(z)_{NI}F} Y_c(z) + \frac{1-G^{-1}(z)_{NI}F(z)}{1+[(G-G_m)G^{-1}(z)_m]G^{-1}(z)_{NI}F(z)} D(z) \quad (16)$$

La stabilité du système en boucle fermé est assurée si les racines du polynôme caractéristique de la fonction de transfert suivante sont dans le cercle unité :

$$H(z) = \frac{G^{-1}(z)_{NI}F(z)}{1+[(G-G_m)G(z)^{-1}_m]G^{-1}(z)_{NI}F(z)} \quad (17)$$

### III.3.4 Règles standard de synthèse dans le cas d'un système stable

La méthodologie de conception, en deux étapes, présentée plus haut peut se formuler sous la forme d'un ensemble de règles qui s'appliquent à un modèle stable. Supposant que le procédé soit décrit par le modèle suivant :

$$G_M(z) = \frac{(z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n - 1)}{(z - p_1)(z - p_2) \dots (z - p_n)} z^{-r} \quad (18)$$

Ou :

$z_i$ : Zéros du système.

$p_i$ : Pôles du système.

$r$ : Nombre de période d'échantillonnage égale au retard.

$n$ : Ordre du système.

Comme on suppose que le modèle est stable, les pôles sont tel que  $|p_i| < 1$ .

- Règle 1 :

Les zéros de  $Q_0(z)$  sont les pôles de  $G(z)$ .

- Règle 2 :

Les pôles de  $Q_0(z)$  sont choisis comme suit :

- Les zéros de  $G(z)$  avec une partie réelle positive qui sont dans le cercle unité.
- Les inverses des zéros de  $G(z)$  avec une partie réelle positive qui sont à l'extérieur du cercle unité.
- Un pôle à l'origine pour chaque zéros à partie réelle négative.

- Règle 3 :  
On ajoute un pôle à l'origine supplémentaire à  $Q_0(z)$  à cause du délai inhérent à l'échantillonnage.
- Règle 4 :  
Le gain de  $Q_0(z)$  doit être choisi tel que  $Q_0(1) \cdot G(1)=1$ .
- Règle 5 :  
Ajouter un filtre à  $Q_0(z)$  pour prendre en compte les erreurs de modèle. En générale on prend :

$$F(z) = \frac{(1-\alpha)z}{z-\alpha} \quad (19)$$

Ce filtre permet d'adoucir la réponse, d'atténuer la sollicitation de la variable manipulée et de réduire la sensibilité du contrôleur aux erreurs de modèle.

### III.4 Synthèse de la loi de commande

La mise en œuvre de la commande à modèle interne est systématique, et suit comme nous l'avons vu, une procédure structurée et efficace ce qui rend sa conception simple et assure ses propriétés de robustesse. Dans ce qui suit, on va appliquer cette méthode au modèle du procédé de neutralisation identifié afin de lui synthétiser un régulateur à modèle interne. On suppose que le modèle est parfait

#### III.4.1 Synthèse de $Q_0$

- Fonction de transfert discrète du modèle obtenue dans le chapitre II :

$$G(z) = \frac{0.004588z + 0.004321}{z^2 - 1.578z + 0.8369} \quad (20)$$

- Pôles et zéros de  $G(z)$  :

➤ Pôles :  $P_1 = 0.7892 + 0.4627i$  et  $P_2 = 0.7892 - 0.4627i$

➤ Zéros :  $Z = -0.9419$

- paramètres du  $Q_0$  :

Les paramètres à calculer sont : les zéros, les pôles et le gain, et à la fin on établira la fonction de transfert  $Q_0$

➤ Zéros :

On appliquant la première règle (voir la page.. de ce chapitre), les zéros du régulateur se sont les pôles du modèle :

$$Z_1 = 0.7892 + 0.4627i \text{ et } Z_2 = 0.7892 - 0.4627i$$

➤ Pôles :

Selon la deuxième et la troisième règle, on aura un pôle double à l'origine :

$$P = z^2$$

➤ Gain du  $Q_0$  :

Le gain est calculer tel que :  $Q_0(1) * G(1) = 1$  selon la règle 4 .

$$K = \frac{1}{0.004588 + 0.004321} = 112.2460$$

➤ Donc la fonction de transfert  $Q_0$  est :

$$Q_0 = \frac{z^2 - 1.578z + 0.8369}{z^2} * 112.2460 \quad (21)$$

### III.4.2 Synthèse du filtre F

La fonction de transfert discrète du filtre est :

$$F(z) = \frac{(1 - \alpha)z}{z - \alpha} \quad (22)$$

Avec  $0 < \alpha < 1$

Le paramètre  $\alpha$  peut être ajusté de façon à modifier le temps de réponse du procédé et aussi la valeur de la commande  $u(z)$ .  $\alpha$  doit être choisi en tenant compte des différentes contraintes à satisfaire.

Pour le procédé étudié, après des essais de simulation réalisé sur Matlab, nous avons opté pour un ( $\alpha = 0.5$ ), donc la structure du filtre  $F(z)$ :

$$F(z) = \frac{0.5z}{z - 0.5} \quad (23)$$

### III.4.3 Structure finale du régulateur

Après la synthèse de  $Q_0$  et le filtre, le régulateur à modèle interne (IMC) aura pour forme finale :

$$Q = \frac{z^2 - 1.578z + 0.8369}{z^2} \cdot 112.2460 \cdot \frac{0.5z}{z - 0.5} \quad (24)$$

### III.5 Simulation du régulateur obtenu

Afin d'évaluer les performances du régulateur à modèle interne (IMC) et ces avantages, nous avons eu recours à des essais de simulation en utilisant logiciel MATLAB, et c'en tenant compte des trois états possibles pour le système (sans perturbations, avec une perturbation qui augmente le pH et avec une perturbation qui diminue le pH).

Dans les tests de simulation, nous avons considéré que le modèle est idéal; donc le procédé aura la même fonction de transfert que le modèle.

Les schémas de simulation sont composés des éléments suivants :

- Entrées échelon : pour la consigne et la perturbation,
- Gain : la valeur numérique du gain de régulateur,
- Fonctions de transfert : pour le régulateur  $Q_0$ , le filtre  $F(z)$ , le modèle et la perturbation.

Pour les deux schémas qui possèdent une perturbation, elle sera représentée sous forme d'un échelon avec en amont une fonction de transfert, pour éviter d'avoir une perturbation brusque (échelon seul) et cela pour se rapproché beaucoup plus de sa nature réelle.

### III.5.1 Système sans perturbation

Dans ce cas, le système est considéré comme parfait sans aucune perturbation.

- Schéma de simulation du système :

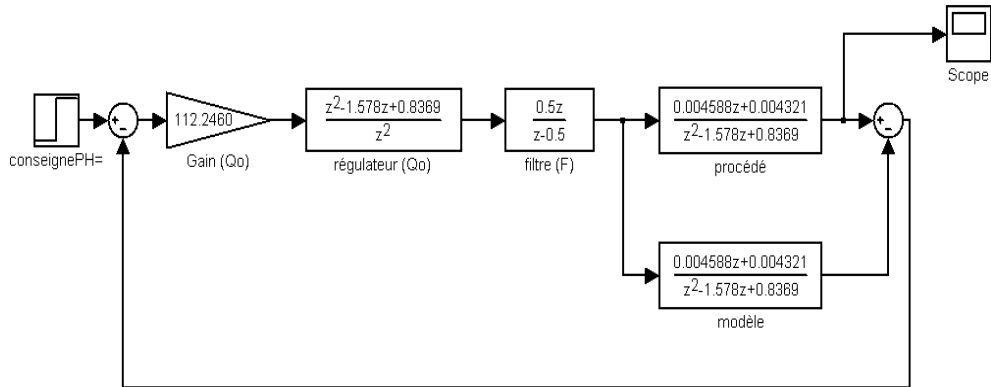


Figure III.5: Schéma de simulation sans perturbation.

- Visualisation graphique de la sortie du procédé :

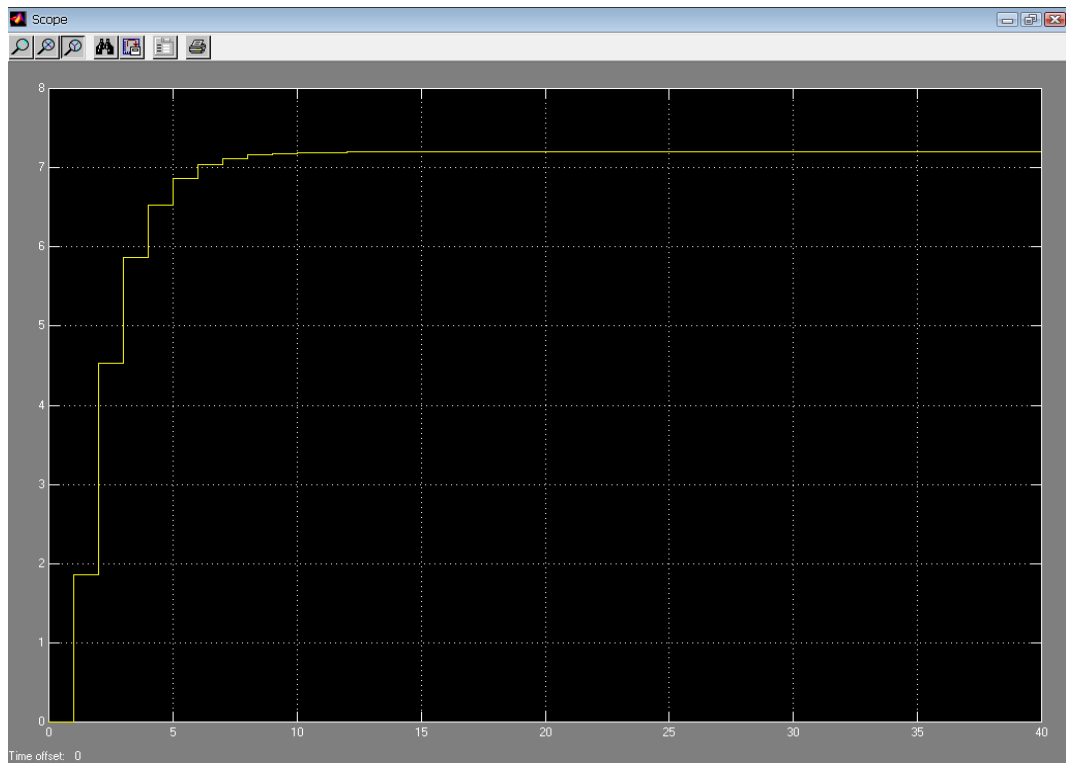


Figure III.6: Courbe de la sortie du procédé sans perturbation.

Dans la figure précédente on remarque que la sortie du procédé (pH) augmente jusqu'à atteindre la valeur 7.2 qui est celle de la consigne ; une fois cette valeur atteinte, la sortie reste constante. Donc pour un système sans perturbation le régulateur aura comme objectif d'amène la sortie du procédé jusqu'à atteindre la valeur désirée et la maintenir fixe.

### III.5.2 Système avec une perturbation qui augmente le pH (positive)

Le système est soumis à une perturbation qui va augmenter la valeur de sortie du procédé (pH).

- Schéma de simulation du système :

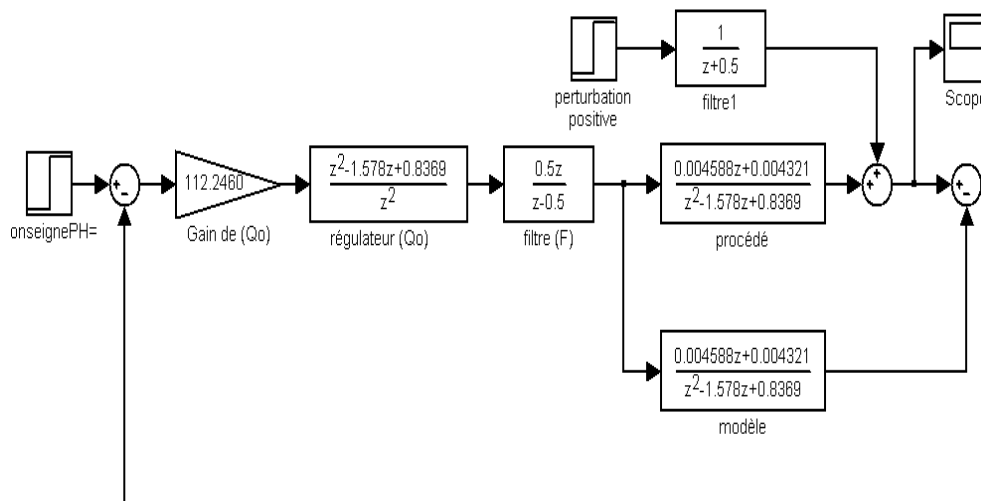
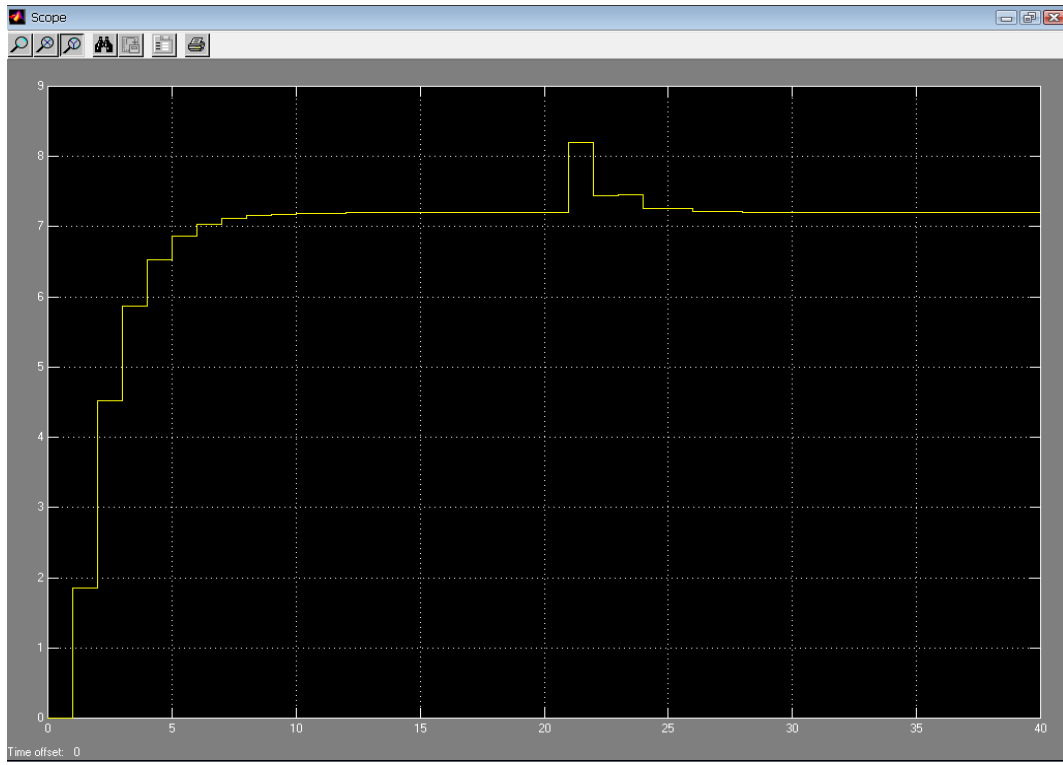


Figure III.7: Schéma de simulation avec une perturbation positive.

- Visualisation graphique de la sortie du procédé :



**Figure III.8: Courbe de la sortie du procédé avec une perturbation positive.**

Quant à la deuxième simulation, on remarque bien dans la figure au-dessus, qu'après l'application de la perturbation, la sortie du procédé augmente et dépasse la valeur désiré, à cet instant le régulateur réagit de façon à ce que la sortie diminue jusqu'à atteindre sa valeur finale qui est égale toujours à la consigne.

III.5.3 Système avec une perturbation qui diminue le pH (négative)

Dans ce cas l'application de la perturbation va diminuer la valeur de la sortie du procédé (pH).

- Schéma de simulation du système :

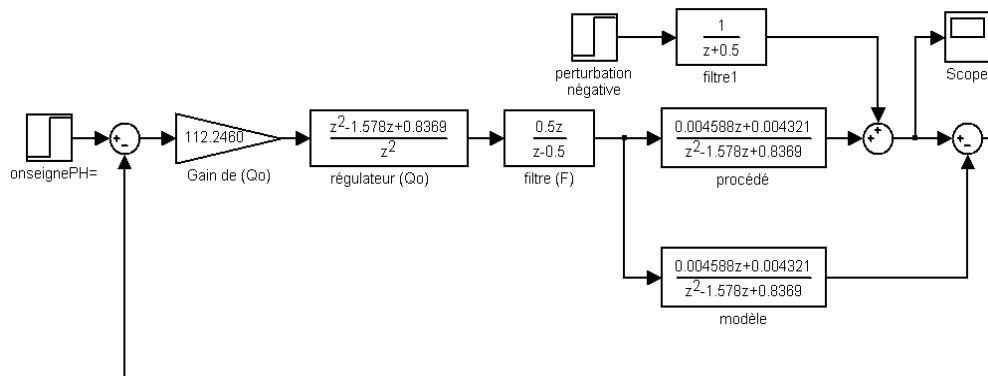


Figure III.9: Schéma de simulation avec une perturbation négative.

- Visualisation graphique de la sortie du procédé :

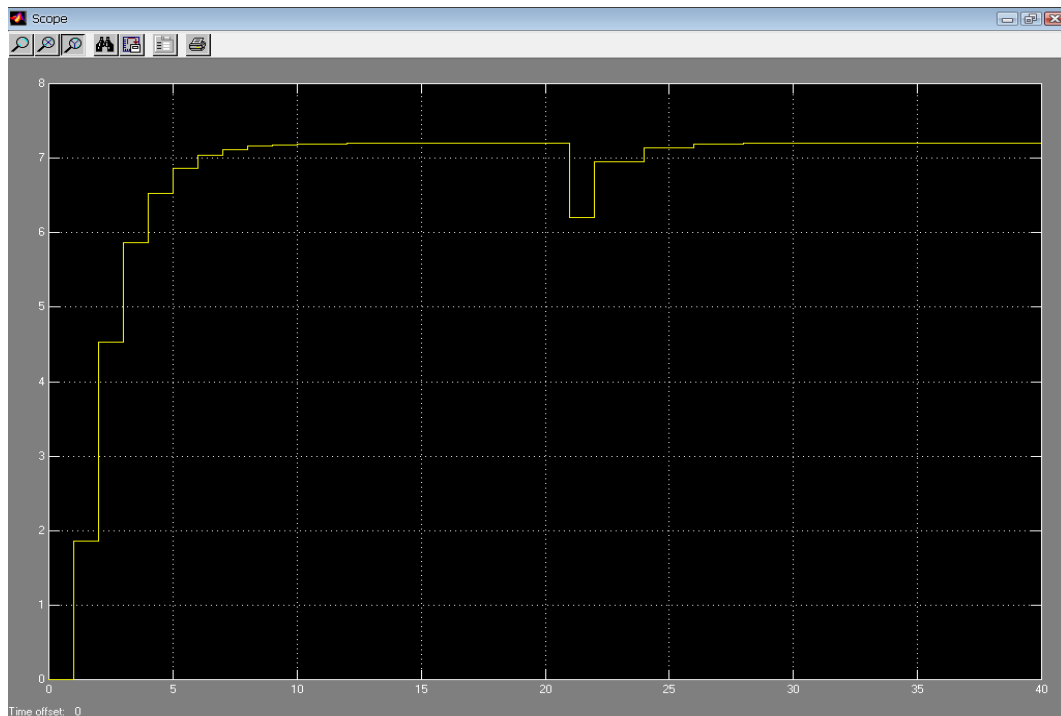


Figure III.10: Courbe de la sortie du procédé avec une perturbation négative.

Pour le troisième cas, on remarque que la valeur du pH est passée au-dessous de la valeur désirée après l'application de perturbation ; ce qui fait intervenir le régulateur pour rejeter l'effet de la perturbation et ramener le pH à la valeur désirée.

### III.5.4 Résultat des simulations

Ces trois simulations réalisées nous amènent à déduire que le régulateur à modèle interne satisfait bien les contraintes souhaités, et quelque soit la nature de la perturbation, le régulateur réagit d'une manière robuste et efficace pour réajuster la sortie du système et l'amener à la valeur désirée.

### III.6 Boucle de régulation adoptée pour l'opération de neutralisation

La boucle de régulation adoptée pour contrôler l'injection du lait de chaux à la sortie des cuves de contact est représentée dans la figure suivante :

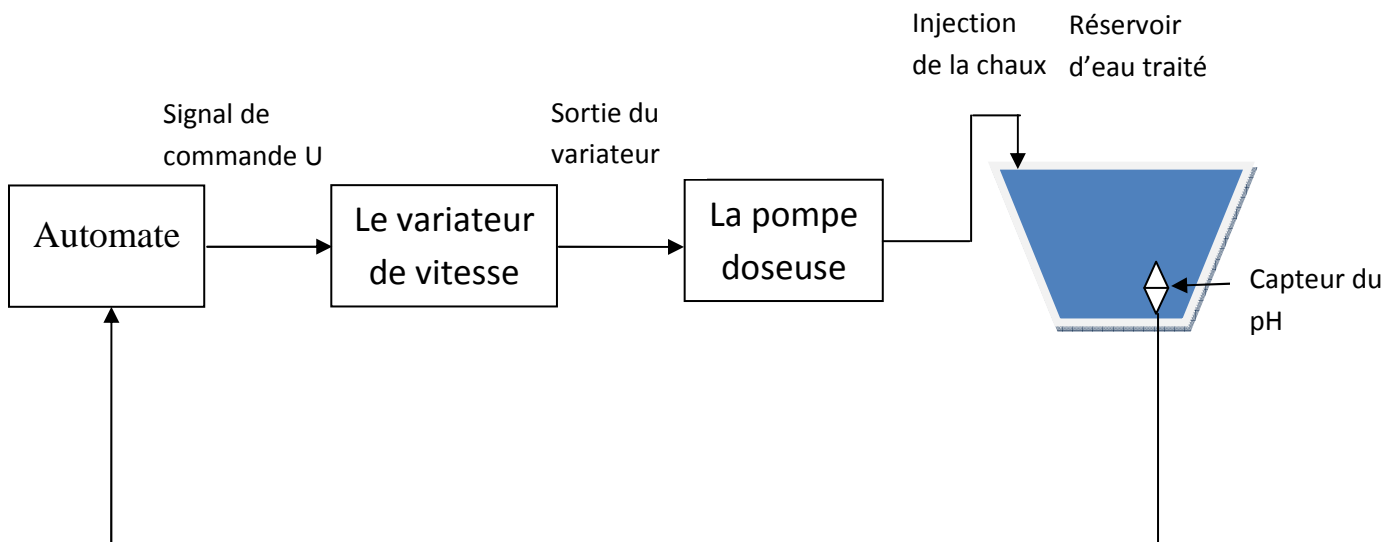


Figure III.11: Schéma de la boucle de régulation.

L'arrêt, le démarrage et la vitesse de la pompe doseuse est effectuée en fonction du signal de variateur de vitesse, qui lui aussi reçoit une commande de l'automate, cette commande permet de déterminer le volume du lait de chaux à injecter pour la neutralisation et cela en fonction de la valeur du pH de l'eau dans le réservoir. Dans ce qui suit nous allons donner une description générale de ces différents éléments

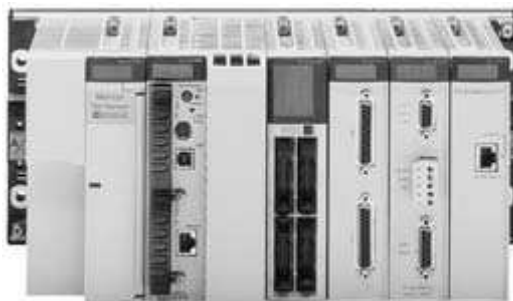
### **III.6.1 Eléments constituant la boucle de régulation**

#### **III.6.1.1 Automates programmables industriels (A.P.I)**

Les automates programmable industriel (A.P.I) sont des appareils électronique adaptés à l'utilisation dans différents types d'industrie, ils réalisent des fonctions d'automatisme afin d'assurer la commande des pré-actionneurs et d'actionneurs à partir d'informations logique, analogiques, ou numérique qu'il reçoivent d'un opérateur ou des différents types de capteurs et détecteurs installés.

#### **III.6.1.2 L'automate programmable qui gère le bâtiment chaux**

Le bâtiment chaux est équipé d'un automate programmable Schneider TSX 572623, ces types A.P.I ont été développés pour être conformes aux principales normes internationales concernant les équipements électroniques d'automatismes industriels en général :



**Figure III.12: L'automate TSX 572623.**

Ces automates ont une structure modulaire, ils sont équipés d'un Processeur TSX P 572623 qui gère l'ensemble de la station automate constituée de modules d'entrées/sorties TOR, de modules analogiques et de modules métier (comptage, commande d'axes, commande pas à pas, communication,...) qui sont répartis sur un ou plusieurs racks.

### III.6.1.2 Variateurs de vitesses ALTIVAR 31 (ATV 31)

Les variateurs Altivar 31 (ATV31) sont des variateurs de vitesses pour moteurs asynchrones triphasés à cage. Les Altivar 31 sont robustes, peu encombrants, facile à mettre en œuvre, Ils intègrent des fonctions répondant aux applications les plus courantes.



Figure III.13: variateur de vitesse ATV 31.

Le variateur Altivar 31 est livré avec radiateur pour ambiances normales et enveloppes aérées. Il est possible d'en monter plusieurs variateurs côte à côte, ce qui entraîne un gain de place important.

#### **III.6.1.2.1 Principe général**

Le variateur Altivar 31 est alimenté à tension et fréquence fixes par le réseau, il assure au moteur, en fonction des exigences de vitesse une alimentation en courant alternatif à tension et fréquence variables.

Pour alimenter convenablement un moteur asynchrone à couple constant quelle que soit la vitesse, l'ATV31 assure l'évolution simultanée dans les mêmes proportions de la tension et la fréquence alimentant le moteur et cela pour maintenir le flux constant dans le moteur.

#### **III.6.1.2.2 Fonctionnement de L'ATV 31**

L'ATV 31 est un convertisseur de fréquence, il utilise le principe de la variation de la fréquence des sinusoïdes et de la tension afin de faire maintenir un couple constant à toutes les fréquences.

Cette technique permet de faire varier la vitesse des machines asynchrones entre deux valeurs limites prédéterminées ( $V_{max}$  et  $V_{min}$ ) de manière régulière, sans à-coup, y compris à basse vitesse. Les principales fonctions intégrées par le variateur sont les suivantes :

- Protections moteur et variateur,
- 16 vitesses présélectionnées,
- Consignes et régulateur PI,
- Rattrapage automatique avec recherche de vitesse et redémarrage automatique,
- Configuration des défauts et des types d'arrêts,
- Sauvegarde de la configuration dans le variateur.

### III.6.1.2.3 Option de dialogue et commande du variateur

Le variateur Altivar 31 (ATV 31) communique avec les éléments suivants :

- **Terminal déporté :**

L'Altivar 31 peut être connecté à un terminal déporté qui donne accès aux mêmes fonctions que l'afficheur et les touches intégrées au variateur. Il peut être utilisé :

- Pour commander, régler et configurer le variateur à distance,
- Pour la signalisation visible à distance,
- Pour mémoriser et télécharger des configurations, 4 fichiers de configuration sont mémorisables.

- **Atelier logiciel PowerSuite**

Les solutions de dialogue évolué PowerSuite présentent les avantages suivant :

- Affichage des messages en clair et en plusieurs langues,
- Préparation du travail en bureau d'études sans que l'Altivar soit connecté au PC,
- Sauvegarde des configurations et réglages sur disquette ou disque dur, ainsi que leur téléchargement dans le variateur,
- Possibilité d'édition sur support papier.

- **Bridge Ethernet/Modbus :**

L'altivar 31 peut se connecter sur un réseau Ethernet via un bridge Ethernet/Modbus. La communication via Ethernet est dédiée principalement aux applications de :

- Coordination entre automates programmables,
- Supervision locale ou centralisée,
- Communication avec l'informatique de gestion de production,

- Communication avec des entrées/sorties distantes,
- Communication avec des produits de contrôle industriel.

● **Passerelles de communication :**

L’altivar 31 peut se connecter sur différents bus de communication par l’intermédiaire des passerelles suivantes :

- Fipio/Modbus,
- DeviceNet/Modbus,
- Profibus DP/Modbus.

**III.6.1.2.4 Branchement de l’ATV31**

Pour le bon fonctionnement du variateur, il faut assurer le branchement convenable des entrées/sortie à leurs places destiné, dans le schéma ci-dessous, on va illustrer un exemple de branchement du l’ATV31 à une pompe doseuse du bâtiment chaud.

- Schéma du branchement :

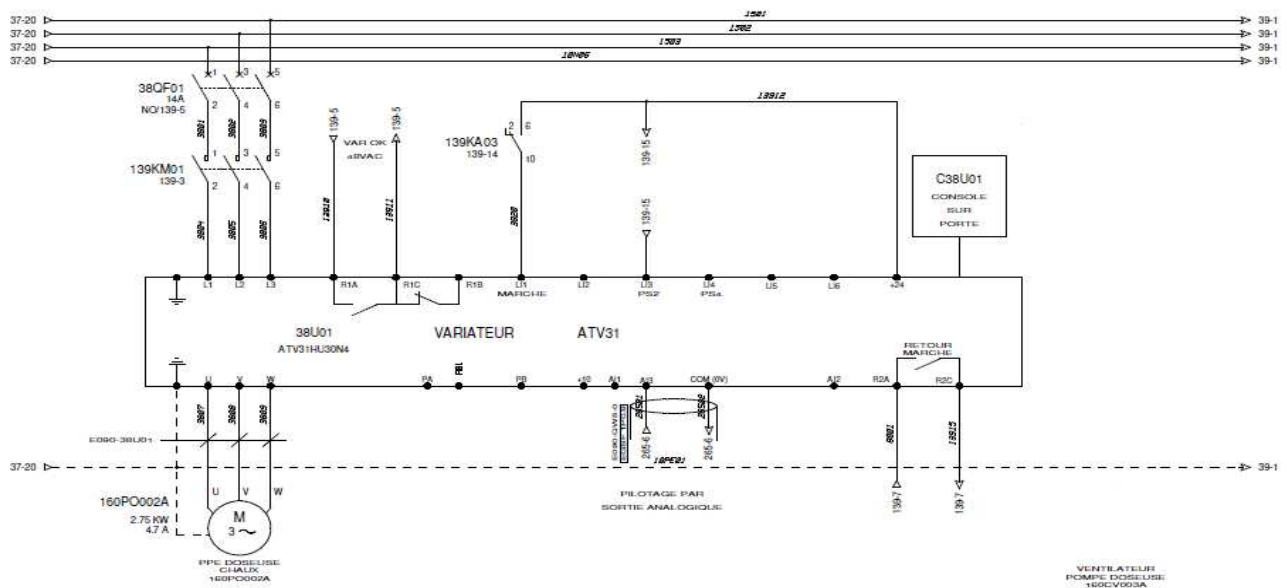


Figure III.14: schéma de branchement de l’ATV 31.

### **IV.6.1.3 Pompes doseuses**

Les pompes doseuses rendent de bons et loyaux services depuis plusieurs décennies ; leur rôle est de doser un produit pour le mélanger à un autre. Ces pompes appartiennent à la grande famille des pompes volumétriques, qui comportent des chambres internes par lesquelles passe le liquide pompé en deux phases (aspiration et refoulement), et pour contrôler leurs débits, il suffit d'agir sur le volume du ou des chambres internes de la pompe et/ou sur sa vitesse de rotation.

#### **IV.6.1.3.1 Paramètres de choix d'une pompe doseuse**

Le choix d'une pompe doseuse et de son installation se fait en fonction de multiples paramètres :

- En premier lieu, les caractéristiques de débit et de pression permettent une première sélection. En effet le produit de ces deux paramètres a la dimension d'une puissance et celle-ci détermine le modèle de pompe à proposer.
- La viscosité du produit pompé permet alors une seconde sélection.
- Le critère de faisabilité est le N.P.S.H., sigle de « Net Positive Suction Head ». Les possibilités pour une pompe de fonctionner à l'aspiration sont d'une grande importance quand la hauteur géométrique d'aspiration est importante, mais aussi quand le liquide est volatil, ou à température élevée, ou stocké sous vide, etc....

#### **IV.6.1.3.2 Type de pompes doseuses utilisées dans le bâtiment chaud**

Dans ce bâtiment sont utilisés des pompes doseuses Milton Roy Europe, leurs caractéristiques principales est d'avoir par construction une cylindrée réglable. Elles appartiennent à la famille des pompes volumétriques alternatives, et à la différence des pompes de type centrifuge qui engendrent une vitesse, les pompes doseuses Milton

Roy Europe engendrent une cylindrée ; à une cylindrée donnée, la variation de la vitesse de rotation de la pompe pour une vitesse donnée permet d'avoir un dosage assez précis du liquide.

#### **IV.6.1.3.3 Réglage des seuils des pompes doseuses Milton Roy Europe**

Les pompes doseuse en régulation marchent à une vitesse dépendant des consignes envoyées aux variateurs de vitesses qui les commandent, et ils délivrent un débit proportionnel à la vitesse dans un domaine de débit limité. Avant la mise en marche de la pompe et selon la documentation du fournisseur, on doit régler le seuil  $Q_{min}$  (débit minimal, correspondant à la vitesse minimal) et le seuil  $Q_{max}$  (débit maximal, correspondant à la vitesse maximal).

#### **IV.6.1.4 Capteur et transmetteur du pH**

La mesure et la transmission de la valeur du pH de l'eau dans le réservoir est effectuée à l'aide d'une sonde pH et un transmetteur représentés respectivement dans les figures suivante :



**Figure III.15.a: Sonde de pH.**



**Figure III.15.b: Transmetteur de pH.**

#### IV.6.1.4.1 Capteur pHD sc par dérivation pH et analyseur ORP

Le pH de la plupart des applications est compris entre 2,5 et 12,5. Le capteur pHD™ par dérivation pH, électrode en verre de gamme large, convient particulièrement bien à cette plage de mesure ainsi il est utilisé dans la station pour la mesure et transmission de la valeur pH dans différents étapes de traitement de l'eau.

Le principe de la mesure du pH est lié au couple rédox qui fait intervenir les protons et l'hydrogène :



Le potentiel pris par une électrode baignant dans un flux d'hydrogène à la pression atmosphérique est donc proportionnel à l'opposé du pH de la solution. Le facteur de proportionnalité est -59,1 mV par unité de pH.

#### IV.6.1.4.2 Transmetteur

Le transmetteur est doté d'un boîtier protégé et traité anticorrosion afin de résister au brouillard salin et à l'acide sulfhydrique. La mesure momentanée et la température de l'échantillon sont affichées sur le transmetteur si un seul capteur est connecté ou deux mesures et les températures correspondantes sont affichées si deux capteurs sont connectés.

Les accessoires en option, tels que le jeu de montage pour le capteur, sont fournis avec les instructions selon les desiderata de l'utilisateur. Il existe différentes possibilités de montage, ce qui permet d'adapter le capteur à de nombreuses applications.

- **Réseau numérique**

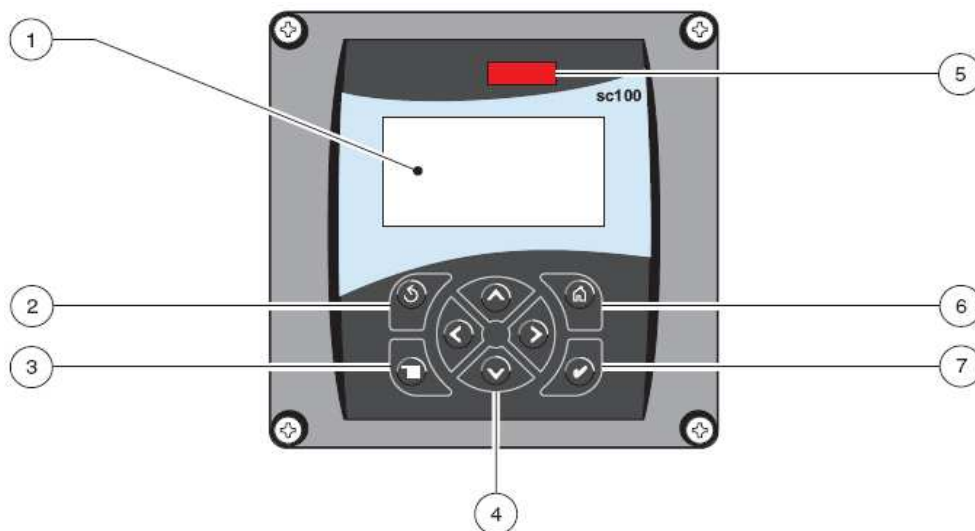
Le transmetteur sc100 est équipé de deux interfaces numériques : réseau numérique et infrarouge. Chacune de ces deux interfaces permet

d'accéder aux données setup, aux mesures et aux archives données et événements.

- **Commande du transmetteur**

- **Clavier**

La figure ci-dessous représentant la face avant du transmetteur.



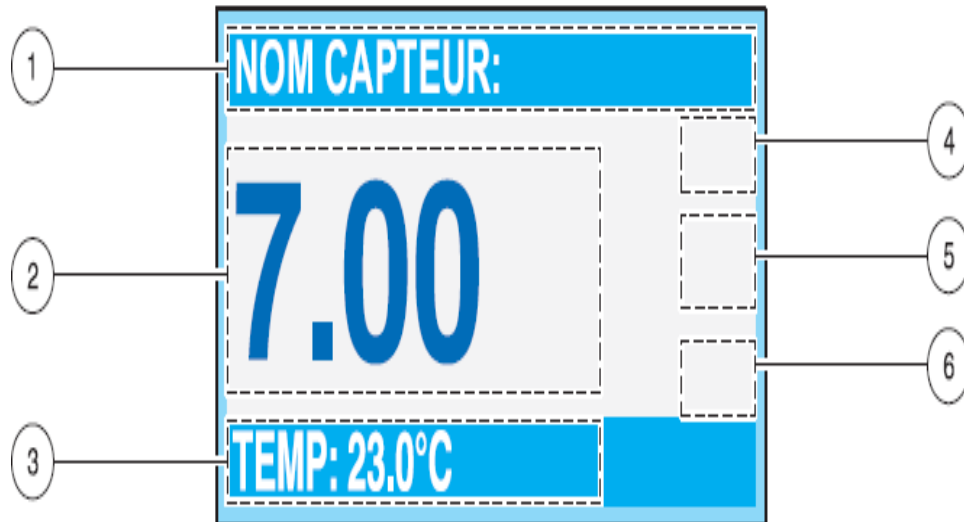
**Figure 18: clavier du transmetteur.**

Le clavier représenté dans la figure précédente est composé de huit touches :

- (1) : Ecran,
- (2) : Touche RETOUR,
- (3) : Touche MENU,
- (4) : Touches fléchées VERT LA DROIT, VERS LA GAUCHE,  
VERT, LE HAUT et VERT LE BAS,
- (5) : TOUCHE HOME,
- (6) : TOUCHE ENTRER.

- **Lecture des mesures**

Pendant le mode mesure, les mesures correspondantes sont affichées sur l'écran du transmetteur si un capteur est connecté. L'affichage clignote, au moment de la mise en service, en cas d'une erreur capteur, si la fonction « SORTIES MEMO » est activée et pendant l'étalonnage du capteur.



**Figure 17: Ecran d'affichage du transmetteur.**

- (1) : Ligne Statut, indique le nom du capteur et le statut de relais. Le nom du relais est affiché si ce dernier et sous tension,
- (2) : Mesure principale,
- (3) : Deuxième mesure (si deux capteurs sont connectés),
- (4) : Paramètres,
- (5) : Zone d'affichage du signal d'alarme,
- (6) : Unité de mesure.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le régulateur à modèle interne (IMC). Ainsi une étude théorique sur la synthèse de ce régulateur a été faite ensuite l'application de la commande à modèle interne pour le processus de neutralisation a été explicitée. Pour évaluer ces performances des tests de simulation ont été réalisés avec le logiciel Matlab.

A la fin nous avons présenté la boucle de régulation du pH et ces différents éléments.

# **CHAPITRE IV**

*Programmation de la loi de commande  
en PL7*

# SOMMAIRE

## **Chapitre I : Présentation de la station de traitement d'eau TAKSEBT**

Introduction.....	01
<i>I.1 Généralités sur la station de traitement de l'eau TAKSEBT.....</i>	<i>01</i>
<i>I.1.1 Objectifs de la station.....</i>	<i>01</i>
I.1.2 Qualité de l'eau d'entrée.....	01
I.1.3 Qualité de l'eau de sortie.....	02
I.2 Organisation de la station.....	03
I.2.1 Bâtiment administratif.....	03
I.2.2 Bâtiment électrique.....	04
I.2.3 Bâtiment chimie.....	05
I.2.4 Bâtiment chlore.....	06
I.2.5 Bâtiment chaux.....	06
I.2.6 Bâtiment acide.....	07
I.2.7 Mécanismes du traitement de l'eau.....	08
I.3 Séquence de traitement de l'eau.....	10
I.3.1 Traitement de l'eau brute.....	10
I.3.2 Traitement des boues.....	13
I.3.3 Préparation et dosage des réactifs.....	13
I.4 Point sur la régulation du pH de l'eau.....	16
Conclusion.....	17

## **Chapitre II : Etude et identification du procédé de neutralisation d'eau**

Introduction.....	18
II.1 Généralités sur le processus de neutralisation de l'eau.....	18
II.1.1 Potentiel Hydrogène (pH.....)	18
II.1.2 Le réactif utilisé.....	19
II.1.3 Taux de traitement / Consommation journalière.....	19
II.2 Elément constituant le procédé de neutralisation.....	19
II.2.1 Poste de dépotage.....	19

II.2.2 Déssacheuse.....	20
II.2.3 Surpresseur.....	20
II.2.4 Silos de stockage.....	20
II.2.5 Cuves de préparation.....	21
II.2.6 Pompes.....	21
III.2.7 Vannes.....	21
II.2.7 Instrumentation du procédé.....	22
II.2.8 Armoires TBTF et TBTA.....	23
II.3 Fonctionnement du procédé.....	23
II.3.1 Remplissage des silos de chaux.....	24
II.3.2 Préparation de la solution lait de chaux.....	27
II.3.3 Dosage de lait de chaux.....	29
II.3.4 Dilution de lait de chaux.....	30
II.3.5 Boucle de soutirage.....	31
II.3.6 Injection de lait de chaux diluée.....	32
II.4 Identification du procédé de neutralisation.....	32
II.4.1 Expérience réalisée.....	33
II.4.2 Résultats obtenus.....	35
II.4.3 Identification par la méthode du modèle.....	38
Conclusion.....	

### **Chapitre III : commande à modèle interne du procédé de neutralisation**

Introduction.....	39
III.1 Régulateur à modèle interne.....	39
III.1.1 Présentation et avantages du régulateur.....	39
III.2 Principe de la commande à modèle interne.....	40
III.2.1 Présentation intuitive de la structure IMC.....	40
III.2.2 Propriétés de la structure IMC.....	42
III.3 Méthodologie de synthèse du régulateur.....	45
III.3.1 Principe de l'approche.....	45
III.3.2 Synthèse de $Q_0$ .....	46
III.3.3 Synthèse du filtre F.....	46
III.3.4 Règles standard de synthèse dans le cas d'un système stable.....	48
	49
	49
	51

III.4 synthèse de la loi de commande.....

III.4.1 Synthèse de  $Q_0$  .....

III.4.2 Synthèse du filtre F.....

## **Introduction**

Au cours du XXe siècle, le monde a connu un formidable essor démographique. Mais alors que la population du monde triplait, la consommation en eau de l'humanité était multipliée par plus de six, par conséquent, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupante pour tous les pays du monde notamment ceux qui traversent des périodes de sécheresse comme notre pays l'Algérie.

Le problème de l'eau dans le monde n'est pas uniquement quantitatif, il est aussi qualitatif, sachant que l'approvisionnement en eau se fait à partir des grand barrages, cependant cette eau nécessite inévitablement de subir un processus de traitement afin qu'elle devienne potable et aussi la protéger adéquatement jusqu'à son arrivée aux utilisateurs.

Dans notre région, le ministère de ressource en eau a chargé la société canadienne SNC-LAVALIN de construire une station de traitement de l'eau à TAKSBET dans la wilaya de Tizi-Ouzou pour alimenter plusieurs régions du centre du pays en eau potable. La station de traitement TAKSBET est très récente et fonctionne avec une technologie d'instrumentation et de commande récente.

L'objectif du notre projet de fin d'études est de concevoir une loi de commande robuste pour le procédé de neutralisation de l'eau afin d'assurer une meilleur qualité à l'eau en terme du potentielle hydrogène (pH). Comme le modèle qui décrit le procédé de neutralisation est complexe, nous avons opté pour la commande à modèle interne CMI. Cette dernière permet de faire face aux erreurs de modélisation, aux variations paramétriques, et les perturbations

affectent le procédé. Comme la loi de commande sera implémentée sur un automate programmable en langage, la version numérique de la commande à modèle interne a été considérée.

Ainsi, le mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre sera consacré à la description générale de la station et son fonctionnement en particulier le bâtiment chaud.
- Le deuxième chapitre présente une étude détaillée du procédé de neutralisation, et l'identification de ce modèle mathématique sous forme de fonction de transfert.
- Le chapitre trois sera consacré au principe de la commande à modèle interne, et son application pour la commande du procédé de neutralisation tout en décrivant les différentes parties de la boucle de régulation à base de régulateur CMI.
- Le dernier chapitre est consacré à la programmation avec le langage PL7 de la loi de commande à modèle interne.

Et le mémoire se termine par une conclusion générale sur le travail réalisé.

# **CHAPITRE I**

## ***Présentation de la station de traitement d'eau TAKSEBT***

## **Introduction**

La station de traitement de l'eau TAKSEBT est construite dans la région THALA BOUNAN dans la wilaya de TIZOU-OUZOU pour alimenter en eau potable plusieurs wilayas du centre du pays.

La production nominale de la station est de 605 000 m<sup>3</sup>/j (7 000 l/s) basée sur un approvisionnement en eau brute de 616 000 m<sup>3</sup>/j. La capacité hydraulique nominale de la station est de 647 000 m<sup>3</sup>/j, prenant en compte un débit recerclé de 5% du débit d'eau brute.

Dans ce présent chapitre, une description générale de la station de traitement est donnée, en particulier, le bâtiment chaud dont l'objectif est la régulation du Ph.

### ***I.1 Généralités***

#### ***I.1.1 Objectifs de la station***

*La station de traitement de l'eau TAKSEBT est conçue pour pouvoir assurer une alimentation fiable et continue en eau potable, exempte d'organismes pathogènes. Dans les conditions de qualité de l'eau contractuelles et d'une exploitation normale, la qualité finale de l'eau après traitement doit conforme aux normes 100 % du temps.*

#### **I.1.2 Qualité de l'eau d'entrée**

L'eau brute alimentant le barrage de TAKSEBT provient de l'oued AISSI et de l'oued BOUG DOURA, sachant que l'alimentation de la station en eau brute se fait à partir de ce barrage, la conception de la station de traitement est basée sur les valeurs de la qualité de l'eau du tableau suivant :

Paramètres	Unité	Valeurs contractuelles		
		Min	Max	Typique
Turbidité	NTU	1	100	5
Couleur	Hazan	5	25	6
Température	C	10	30	18
Fer	Mg/l Fe	0.05	5	0.15
Manganèse	Mg/l Mg	15	60	24
PH	-	7	9	8
E. coli	MPN/100ml	5	5000	100
Coliformes totaux	MPN/100ml	10	10000	200

Dans le futur, la qualité de l'eau peut encore évoluer. La couleur peut s'élever par développement de plancton en période chaude, et le pH peut s'abaisser ainsi que la teneur en oxygène.

### I.1.3 Qualité de l'eau de sortie

Après un processus de traitement, basé sur plusieurs étapes, la qualité d'eau potable à distribuer doit être adéquate aux normes suivantes :

- Turbidité (avant injection de chaux) : inférieur à 1.0 NTU,
- Couleur : inférieur à 5° Hazen,
- Aluminium : inférieur à 0.2 mg/l,
- Fer : inférieur à 0.3 mg/l,
- Manganèse : inférieur à 0.1 mg/l,
- pH : 6.5 à 8.5,
- E coli ou bactérie thermo-tolérante : néant sur tout échantillon de 100ml,
- Total bactéries coliforme : néant sur tout échantillon de 100m,
- Cout et odeur : acceptable pour les consommateurs.

En ce qui concerne les autres paramètres individuels de qualité de l'eau traitée comme la quantité (Mg/l) de Nitrite, Sodium et Chlorure...etc. Ceux-ci seront

inférieurs aux valeurs désirables les plus élevées recommandées par les normes les plus récentes de l'OMS pour les eaux de boisson.

## **I.2 Organisation de la station**

La station de TAKSEBT est construite en blocs modulaires. Chaque bloc est conçu pour réaliser des fonctions spécifiques nécessaires pour le fonctionnement de la station. Elle se présente ainsi :

### **I.2.1 Bâtiment administratif**

Il porte ce nom du fait qu'il contient le bloc administratif, cependant il abrite deux autres éléments essentiels qui sont, le laboratoire et la salle de contrôle et de commande.

- **Bloc administratif**

Pour le contrôle et la gestion de la station, un bloc administratif est prévu, il contient les bureaux des fonctionnaires travaillant dans la station, à leur tête le directeur général. L'activité administrative remplit des fonctions essentielles : répondre aux demandes d'informations légales (déclarations fiscales, comptabilité, enquête, douanes), prendre et contrôler les décisions, coordonner les acteurs de l'organisation, notamment le personnel.

- **Laboratoire d'analyse**

Un laboratoire d'analyse interne à la station est installé au sein du bâtiment administratif, il permet l'analyse régulière de la qualité de l'eau à chaque étape de traitement, elle est indispensable pour vérifier l'efficacité du processus de traitement et garantir une eau potable sûre et de bonne qualité. Les résultats de l'analyse permettent de prendre les mesures nécessaires pour régler des problèmes particuliers. Le forfait d'analyse de base de l'eau potable comprend l'analyse de la turbidité, Fer, Manganèse, pH...ect.

- **Salle de contrôle et commande**

La salle de contrôle permet de piloter l'ensemble des procédés de traitement de la station de TAKSEBT, qu'ils s'agissent des décanteurs, flocculateurs, filtres, ... etc. Des programmes informatiques implémentés dans des automates programmables (API) aident à l'optimisation en continu des paramètres de conduite de la station. Toutes les données de commande et d'exploitation de chaque unité sont centralisées dans la salle de contrôle de la station, ainsi que les unités d'exploitation éloignées (stations de pompage et les grands réservoirs) sont reliées au processus global par lignes dédiées.

### **I.2.2 Bâtiment électrique**

La particularité d'une station de traitement de l'eau c'est qu'elle doit fonctionner sans interruption, étant donné que l'alimentation en énergie électrique de la station de TAKSEBT provient du réseau SONALGAZ qui n'est pas à l'abri des coupures pour maintenance ou d'autres raisons, un bâtiment dit électrique assure l'alimentation permanente en énergie électrique de la station en cas des coupures ou des perturbations dans le réseau.

Les composants essentiels suivant assurent l'alimentation et la production de l'énergie électrique au sein du bâtiment :

- Deux transformateurs abaisseurs qui fonctionnent en alternance, en cas d'arrêt (panne) de l'un l'autre fonctionne, ils sont alimentés de l'énergie du réseau qui est de 30kV et nous donne en sortie une tension de 400V pour alimenter les équipements de la station.
- Deux groupes électrogènes de puissance 1000kVA chacun, comme les transformateurs, ils fonctionnent en alternance, l'un d'eux doit démarrer après 60 seconde de la coupure de l'énergie du réseau, il donne en sortie une tension de 230V/400V.
- Tableau général basse tension (TGBT), c'est le tableau électrique basse tension qui est utilisé dans les grandes installations électriques. Dans la station, il assure le lien entre l'énergie électrique en provenance des

transformateurs ou des groupes électrogènes et les armoires électriques qui sont installés dans chaque bâtiment et dans les différents compartiments. Il permet aussi une adaptation de tension pour la suite de l'installation et la commande autonome de l'alimentation ou coupure de l'énergie pour chaque bâtiment. Ce dernier est très nécessaire pour les raisons de maintenance.

- Batterie de compensation globale, elle est raccordée en tête d'installation pour assurer la compensation pour l'ensemble des charges. Elle convient essentiellement à supprimer les pénalités et soulager le poste de transformation ; l'autre objectif de la compensation d'énergie réactive est de réduire le courant appelé sur le réseau.

### **I.2.3 Bâtiment chimie**

Le stockage, la préparation et le dosage des produits chimiques utilisés dans le traitement chimique de l'eau sont fait dans le bâtiment chimie où quatre solutions sont préparées à partir des réactifs suivant : le polymère, charbon actif en poudre, sulfate d'aluminium et permanganate de potassium. Des utilitaires sont installés pour le stockage, la préparation des solutions à des concentrations requises et leurs injections aux doses requises dans la chambre dissipation et les chambres de mélanges. En général, on trouve dans le bâtiment :

- Trémies de stockage pour chacun des quatre produits,
- Cuves de préparation des solutions par les produits chimiques,
- Pompes doseuses pour injection de chaque produit,
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.2.4 Bâtiment chlore**

Le chlore est livré à la station en tanks qui sont stockés dans le bâtiment. Chaque tank est pressurisé et contient à la fois du chlore liquide, en partie basse, et du chlore gazeux, en partie haute. Le bâtiment contient deux lignes de soutirages connectées chacune à 2 tanks. Le chlore liquide est ensuite dirigé vers les évaporateurs, où il est chauffé à température constante pour passer en phase gazeuse.

En aucun cas du chlore ne doit se trouver sous forme liquide au-delà de ce point. Le chlore gazeux dilué dans l'eau est dirigé, suivants les choix de l'exploitant, vers les points d'injection du chlore qu'on trouve dans les chambres de mélanges, les canaux d'eau décantée et dans les cuves de contacts. Le bâtiment contient essentiellement :

- Des fûts à connecter aux tanks pour le soutirage du chlore (liquide et gazeux),
- Des évaporateurs, le chlore soutiré sous forme liquide est dirigé vers les évaporateurs, où il passe en phase gazeuse.
- Pompes d'eau motrices et hydro-éjecteurs. L'hydro-éjecteur est un dispositif de mélange entre chlore gazeux et eau. Les pompes d'eau motrice assurent un débit d'eau à travers l'hydro-éjecteur,
- Chloromètres qui permettent de doser et de mesurer précisément la quantité de chlore injectée.
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.2.5 Bâtiment chaux**

Dans ce bâtiment, un système est conçu pour l'utilisation de la chaux en poudre afin de préparer une solution de lait de chaux par dilution de la chaux en poudre dans de l'eau traitée. Ensuite le lait de chaux est injecté à l'eau dans le réservoir d'eau traitée. Le stockage de la chaux consiste en silos avec un grand volume de stockage, les silos sont complets avec les utilitaires de préparation et d'injection de lait de chaux. Le système de préparation et injection de lait chaux est complètement automatisé. Cependant une intervention d'un opérateur est nécessaire pour la détermination du volume de lait de chaux à injecter. Le bâtiment est principalement composé de :

- Silos de stockage de la chaux,
- Bacs de préparation de lait de chaux,
- Pompes doseuses pour l'injection,

- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.1.6 Bâtiment acide**

Le traitement de l'eau fait inévitablement appel à des réactifs qui doivent pouvoir être livrés, stockés et utilisés en toute sécurité. Dans la station, le bâtiment acide est utilisé pour un stockage adéquat de l'acide sulfurique, il contient aussi des installations qui sont dédiées pour la préparation et injection de la solution d'acide sulfurique à l'eau brute. Les points d'injection sont installés dans la chambre de dissipation et les chambres de mélanges. Pour assurer ces différentes opérations le bâtiment est équipé :

- Des trémies contenant l'acide sulfurique,
- Cuves de préparation de la solution d'acide sulfurique,
- Pompes doseuses,
- Armoire de puissance (TBTF) et armoire automate (TBTA).

### **I.2.7 Mécanismes de traitement de l'eau**

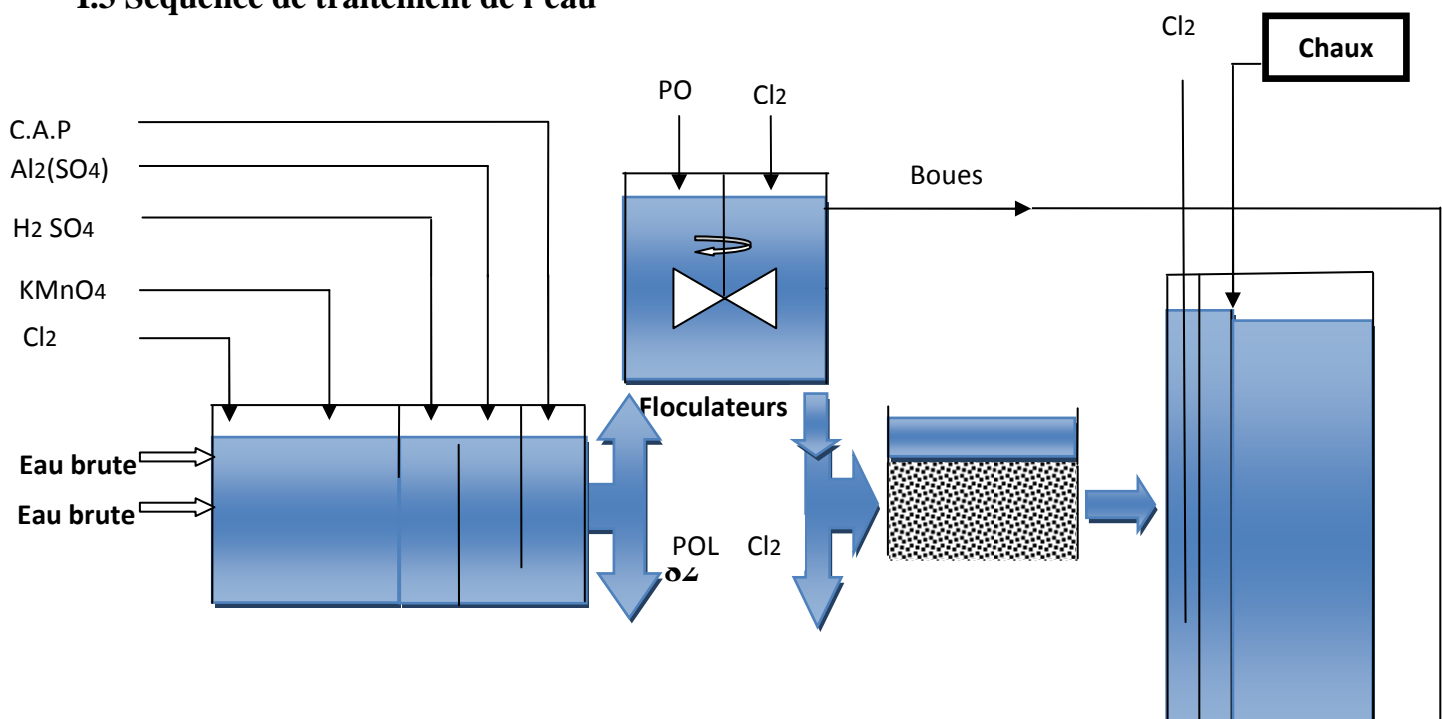
Le schéma synoptique de la figure I.1 montre tous les dispositifs utilisés dans les différentes étapes de traitement de l'eau brute et des boues engendrées. La succession et la localisation ces dispositifs sont prévues pour assurer un enchaînement de traitement permettant d'avoir une eau de bon qualité, afin de subir à la fin une dernière désinfection et une neutralisation pour être prête à la consommation. Concernant les boues, après leur épaissement elles seront dirigées vers la lagune de boues.

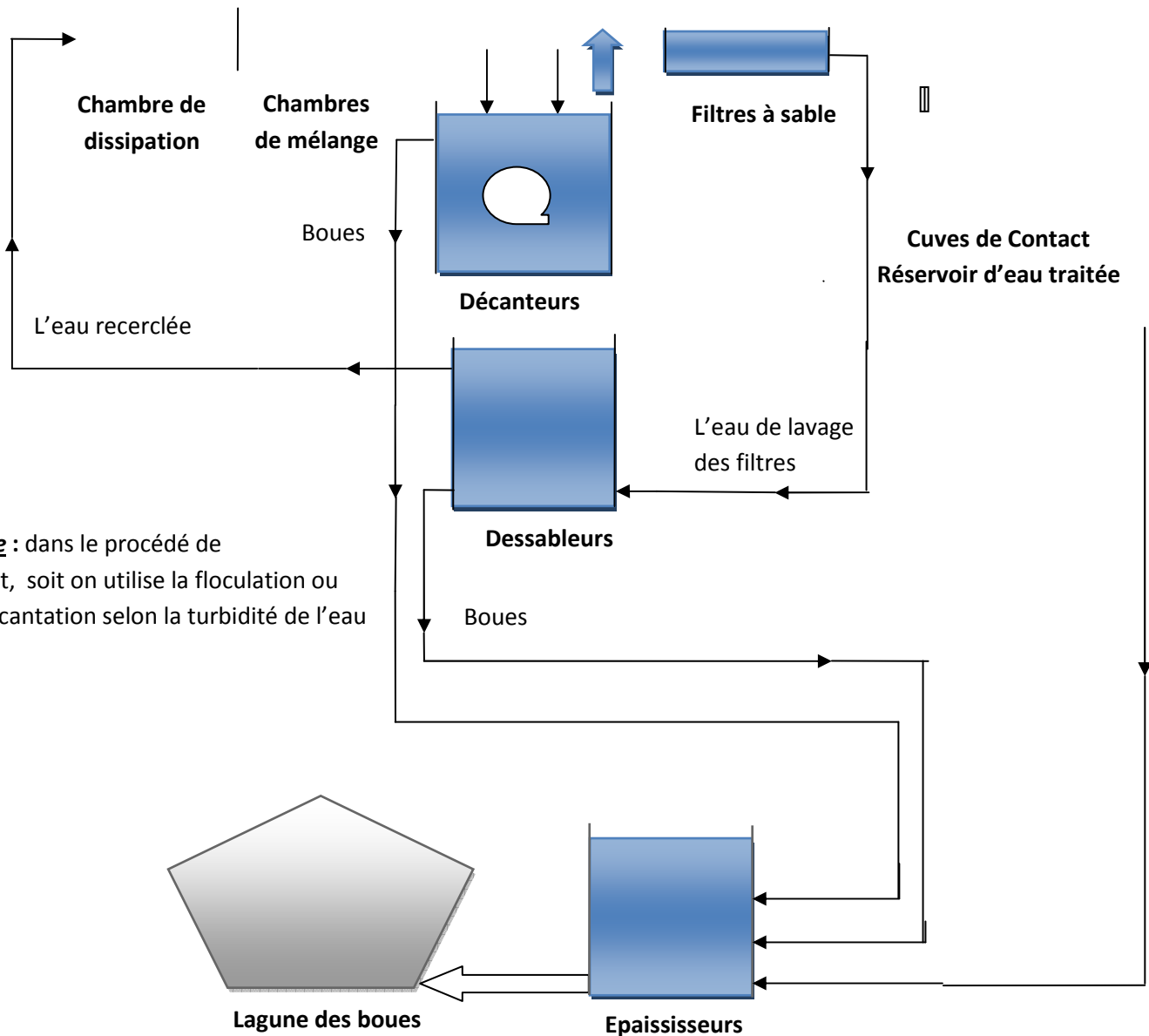
Le dispositif de traitement est composé de :

- Chambre de dissipation,
- Chambres de mélange,
- Décanteurs,
- Flocculateurs,
- Filtres,
- Cuves de contacts et réservoir,
- Dessableurs,
- Epaisseurs.

Dans ces différents éléments mentionnés sont installés des points d'injections des réactifs chimiques.

### I.3 Séquence de traitement de l'eau





**Figure I.1 : Schéma simplifié des mécanismes de traitement de l'eau.**

### I.3.1 T.....

Pour rendre l'eau potable, on lui applique des traitements variés qui obéissent tous au même principe : éliminer les éléments de matière contenus dans l'eau par étapes successives, jusqu'aux organismes microscopiques comme les virus et les microbes. Tout cela se fait selon les étapes suivantes :

#### I.3.1.1 Dissipation, mélange et répartition

L'eau brute provenant du barrage, mélangée au retour d'eau des dessableurs, est introduite par des déversoirs dans la chambre de dissipation représentée dans la figure I.2.



**Figure I.2: chambre de dissipation.**

Indice	Description
A	Déversoirs d'arrivée d'eau
B	Mesure de niveau ultrasonique
C	Analyseur de turbidité, conductivité et pH
D	Déversoir de trop plein

Son rôle principal est la tranquilliser le débit d'eau brute et assurer le mélange hydraulique des réactifs avec addition de permanganate, acide sulfurique, sulfate d'aluminium et charbon actif en poudre. Ces réactifs sont dosés en fonction des besoins déterminés par le débit et la qualité de l'eau brute. Ensuite, l'ouvrage de répartition permet de diriger le débit soit :

- Vers les décanteurs, via les déversoirs de répartition, au niveau desquels du polymère est ajouté.
- Vers les flocculateurs et les filtres directement, via les canaux de by-pass des décanteurs.

### **I.3.1.2 Clarification**

Le débit d'eau brute sortant des chambres de mélange est dirigé soit vers les flocculateurs ou les décanteurs et cela selon la turbidité de l'eau ; si l'eau est limpide, elle sera dirigé vers les flocculateurs sinon elle passe par les décanteurs. L'objectif de cette opération est de clarifier l'eau brute, par séparation physique des Matières en Suspension (MES) présentes dans l'eau brute qui seront ensuite extraites de l'ouvrage et dirigées vers le traitement des boues.

Les MES de très petite taille (colloïdales) peuvent très difficilement décanter par l'action de la gravité seule, elles sont rassemblées en floc de taille plus importante par l'action de ces réactifs :

- Un coagulant (Sulfate d'Alumine) permet de neutraliser les forces de répulsion existantes entre les particules colloïdale, et ainsi de former des floccs.
- Un flocculant (Polymère) permet de créer des liaisons entre les floccs pour augmenter leur volume.

### **I.3.1.3 Filtration**

L'eau provenant des décanteurs ou des flocculateurs est répartie entre les 12 filtres où elle est filtrée gravitairement. Eventuellement, du chlore (inter-chloration) et du CAP auront été injectés dans l'eau clarifiée.

L'eau à filtrer passe à travers un lit filtrant constitué de sable, dont la hauteur de couche est importante et dépend du type de filtre. Les matières en suspension sont retenues dans les espaces intergranulaires, sur la plus grande partie de la hauteur de couche ; ensuite l'eau filtrée est collectée dans un canal et dirigée vers les cuves de contact de chlore.

Avant que le traitement ne se dégrade, les filtres subissent un cycle de lavage automatique pour éliminer les particules capturées, le lavage se fait à l'eau et à l'air, en contre-courant et la fréquence de ce lavage dépend principalement de la concentration en MES, du débit et de la nature et granulométrie du matériau filtrant ; Pendant la

phase de lavage, la production d'eau filtrée est interrompue. A la fin du lavage, le filtre sera disponible pour la filtration.

L'eau de lavage, chargée, est collectée et dirigée vers le bassin d'équilibre et la filière de traitement des boues.

Pour les deux filières, l'eau et l'air pour le lavage ainsi que l'air comprimé nécessaires au procédé sont produits dans le bâtiment d'exploitation des filtres.

#### **I.3.1.4 Désinfection et stockage d'eau traitée**

La désinfection finale de l'eau traitée est faite dans des cuves de contact, par l'injection de chlore; après l'eau passe dans le réservoir d'eau traitée. La chaux y est injectée pour contrôler le pouvoir corrosif de l'eau (neutraliser l'eau).

Le réservoir d'eau traitée permet de stocker l'eau avant sa distribution au réseau et aussi l'alimentation en eau de service de la station.

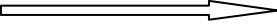
### **I.3.2 Traitement des boues**

Les eaux de lavage des filtres sont d'abord concentrées dans les dessableurs avant d'être mélangées aux boues extraites des décanteurs ou flocculateurs. Les boues sont ensuite épaissies dans les épaisseurs avant d'être pompées dans la lagune de stockage de boue.

### **I.3.3 Préparation et dosage des réactifs**

Les réactifs suivant sont préparés et dosés dans des bâtiments spécifiques, et ensuite ils seront injecter dans les différents points d'injection selon la nécessité de chaque étapes de traitement.



Exemple d'un point  
d'injection d'un  
réactif 

**Figure I.3 : Entrée des chambres de mélanges.**

- **Sulfate d'alumine**

Le sulfate d'aluminium est essentiellement utilisé dans les stations municipales de traitement de l'eau potable et des eaux usées. Dans la station de TAKSEBT, le sulfate d'aluminium cristallisé  $Al_2(SO_4)_2$  est utilisé pour la coagulation des matières en suspension très fines et colloïdales contenues dans l'eau brute et éliminer les bactéries.

- **Permanganate de potassium**

Le permanganate de potassium ( $KMnO_4$ ) est principalement utilisé pour la précipitation du manganèse si la qualité de l'eau brute le demande, il peut également être utilisé pour le contrôle des charges organiques, en remplacement de la préchloration.

- **Acide sulfurique**

L'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) est utilisé dans le traitement de l'eau brute qui est souvent sujette à un ajustement du pH. C'est une Substance qui se dissocie plus ou moins complètement dans une solution aqueuse comme l'eau pour produire des ions hydrogène ( $H^+$ ) ainsi l'acide sulfurique est utilisé pour la diminution du pH de l'eau pour faciliter la coagulation.

- **Chaux**

La chaux éteinte ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) est une poudre sèche fabriquée en hydratant la chaux vive avec suffisamment d'eau pour combler son affinité chimique avec l'eau, et ainsi on obtient le lait de chaux.

Le lait de chaux se classe en tête parmi les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau potable et de l'eau destinée aux industries. Elle est utilisée pour améliorer la qualité de l'eau et spécialement pour ajuster le pH (augmenté le pH) de l'eau et pour adoucir l'eau et éliminer l'arsenic.

- **Charbon actif en poudre (CAP)**

Il a une structure poreuse qui permet l'absorption d'une large gamme de composés et sa grande surface d'échange et ces propriétés d'absorption font de ce charbon activé un excellent choix pour l'amélioration du goût, la disparition des odeurs, la diminution du chlore, de l'ozone et de micropolluants comme pesticides et autres substances organiques dissoutes.

- **Polymère**

Le polymère est un flocculant, permettant d'agréger les particules fines en flocs de taille supérieure, plus facile à décantier. Le polymère est préparé pour des usages distincts :

- **Ligne eau**

Préparation et dosage pour injection dans les chambres de répartition et/ou dans les canaux de by-pass des décanteurs.

- **Ligne boues**

Préparation et dosage pour injection au dessableur et épaisseurs pour la formation de flocs de boue afin d'améliorer la décantation.

- **Chlore**

Le chlore ( $\text{Cl}_2$ ) est l'un des réactifs les plus utilisés en désinfection, il a joué un rôle important dans le traitement de l'eau depuis des dizaines d'années. L'injection du chlore se fait en trois étapes :

➤ **Pré-chloration**

Elle permet d'obtenir une meilleure filtrabilité en aidant la coagulation, et une meilleure qualité de l'eau par la destruction des micro-organismes comme les bactéries.

➤ **Inter-chloration**

Cette étape a les mêmes objectifs que la pré-chloration avec en plus un effet désinfectant pour le media filtrant.

➤ **post-chloration**

C'est la dernière étape, elle a pour but, l'élimination des micro-organismes, de façon à répondre aux normes de qualité de l'eau traitée.

#### **I.4 Point sur la régulation du pH de l'eau**

Comme a été indiqué précédemment, la consigne sur le volume de lait de chaux à injecter est déterminée à l'aide d'un opérateur dans la salle de contrôle et de commande en se basant sur les résultats d'analyse faite sur l'eau. En effet un autre opérateur dans le laboratoire réalise une neutralisation sur un volume bien déterminé de l'eau en ajoutant des volumes précis de lait de chaux déjà préparé à une concentration requise. Une fois le pH désiré atteint, l'opérateur transmet la concentration de lait chaux préparé et le volume qu'il a injecté à l'opérateur de la salle de contrôle et de commande ; ensuite l'opérateur dans la salle se charge d'introduire ces valeurs dans le programme implémenté dans l'automate programmable du bâtiment chaux via l'écran de la supervision, et par un sous-programme de calcul il détermine le volume à injecter et enfin l'automate agit sur le procédé d'injection de lait de chaux.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, notre objectif principal consiste à élaborer une loi de commande qui va commander le procédé d'injection de lait de chaux pour que le volume injecté soit juste en fonction de la valeur du Ph de l'eau dans le réservoir, cette mesure est effectuée par un capteur qui est déjà installé. Cette

commande permet d'améliorer considérablement le pH de l'eau, et aussi de réajuster le pH pour une valeur désiré.

## **Conclusion**

Le défi du traitement de l'eau est de fournir une eau de haute qualité à prix abordable, tout en gérant tous les problèmes potentiels d'un approvisionnement donné et du système de traitement. Dans une séquence de traitement, chaque barrière est conçue pour protéger la qualité de l'eau, pour régler des problèmes de qualité particuliers ou à ces deux fins à la fois. Un système de traitement comportant plusieurs barrières règle plusieurs problèmes de qualité de l'eau, ce qui améliore le niveau de protection à chaque étape de traitement. Dans tout système de traitement, on trouve l'étape de neutralisation qui est réalisée par un procédé conçu à cette opération. Le procédé neutralisation de la station de traitement d'eau de TAKSEBT sera présenté et identifié dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE II**

*Etude et identification du procédé de  
neutralisation d'eau*

## **Introduction**

L'eau potable est soumise à un procédé de neutralisation destiné à réguler son pH. Pour ce faire un mécanisme a été conçu pour la préparation et le dosage de lait de chaux qui se classe en tête parmi les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau potable et de l'eau destinée aux industries.

Dans ce chapitre, on va d'abord présenter le procédé de neutralisation et son fonctionnement puis on passe à l'identification d'un modèle mathématique du procédé par la méthode.

## **II.1 Généralités sur le procédé de neutralisation de l'eau**

### **II.1.1 Potentiel Hydrogène (pH)**

Le pH, abréviation de "potentiel Hydrogène" est un indice qui traduit la concentration d'ions Hydrogènes dans une solution. Il détermine l'acidité, l'alcalinité ou la neutralité de l'eau. L'échelle qui sert à le mesurer est comprise entre 0 et 14. Toute eau est caractérisée par un pH d'équilibre ou de saturation (pHs). Si le pH est supérieur à ce pHs, l'eau est dite incrustante, s'il est inférieur, l'eau est dite agressive. Idéalement, le pH de l'eau doit être égale au Phs, elle est ni incrustante, ni agressive. Le pH d'une eau est directement lié à son origine et à la nature des terrains qu'elle traverse. Suivant sa valeur, il est parfois nécessaire de le rééquilibrer car le pH de l'eau peut avoir de nombreuses incidences sur d'autres paramètres ou systèmes ( par exemple les conduites d'eau).

Une eau incrustante précipite le calcaire et dépose une couche de calcaire sur les parois des conduites, jusqu'à éventuellement les obstruer partiellement. Une eau agressive attaque le calcaire en solubilisant les carbonates sous forme de bicarbonates. Elle est responsable de corrosion des conduites.

L'injection de lait de chaux permet de modifier les caractéristiques de l'eau de façon à ce que le pH soit aussi proche que possible du pHs ou légèrement supérieur. En pratique, l'injection de chaux sera réglée pour obtenir  $\text{pH} = \text{pHs} + 0,2$ .

### **II.1.2 Le réactif utilisé pour la neutralisation**

Le réactif utilisé est la chaux éteinte, ou chaux hydratée :  $(Ca(OH)_2)$  . Le produit est livré sous forme de poudre en vrac ou par sacs de 25kg à vider par la dessacheuse.

La chaux est préparée, sous forme de lait de chaux, et dosée dans le bâtiment chaux, ensuite le lait de chaux est injecté à la sortie de cuve de contact.

### II.1.3 Taux de traitement / Consommation journalière

Les dosages de lait de chaux estimés, au débit d'eau brute nominal sont résumés dans le tableau ci-après.

Moyen			Maximal		
$g/m^3$	Kg/h	Kg/j	$g/m^3$	Kg/h	Kg/j
10	252	6050	30	756	18150

## II.2 Elément constituant le procédé de neutralisation

### II.2.1 Poste de dépotage

Les sacs de chaux peuvent être déposés soit dans les dessacheuses puis vers les silos de stockage si le produit arrive dans des sacs, soit directement dans les silos de stockage si le produit arrive dans des camions vrac à l'aide d'un système de transport pneumatique.

### II.2.2 Dessacheuse

La dessacheuse représente la solution idéale pour extraire le contenu des sacs contenant de la chaux éteinte, dans un environnement caractérisé par la présence de poussière à l'extérieur.

### II.2.3 Surpresseur

Il existe dans le bâtiment deux surpresseurs, leurs objectifs est de permettre le transport pneumatique de la chaux vers les silos de stockage. Les surpresseurs sont équipés de détecteurs qui permettent d'identifier la connexion d'un flexible de transport pneumatique sur les conduites de remplissage de chaque cuve.

#### **II.2.4 Silos de stockage**

Ceux sont 4 enceintes en béton de 200  $m^3$  de volume chacune, utilisées pour le stockage de la chaux éteintes, chaque silo est équipé des éléments suivants :

- Détecteurs de niveaux bas et haut,
- Dépoussiéreurs, placé au sommet du silo pour évacuer la poussière,
- Un dévouteur en partie inférieur conique, permet d'éliminer la formation de voutes empêchant l'écoulement de la chaux,
- Un doseur qui permet le soutirage d'un débit fixe de chaux.

#### **II.2.5 Cuves de préparation**

Il existe 4 cuves de préparation (A, B, C et D), chacune est associée à un silo de chaux et ont un volume utile de 27  $m^3$ . Les injecteurs déversent la chaux sortant des doseurs dans ces cuves.

Chaque cuve est équipée des éléments suivants :

- Appareil de mesure de niveau ultrasonique dont la fonction est la mesure du niveau de lait de chaux dans chaque cuve,
- Agitateur utilisé pour assurer le mélange de l'eau et de la chaux,
- Vanne motorisée utilisée pour l'alimentation en eau de service de chaque cuve.

#### **II.2.6 Pompes**

Le procédé de neutralisation contient plusieurs types de pompes, et chacune réalise une fonction distincte, et par conséquent la composition et le type d'une pompe est différent des autres. Dans ce qui suit, nous citerons ces différentes pompes, quant au rôle de chacune, il sera décrit dans le fonctionnement du procédé. Les différentes pompes sont :

- Pompe centrifuge,
- Pompe doseuse,
- Pompe de la boucle de soutirage,
- Pompe de dilution,
- Pompe vide-cave.

### **II.2.7 Vannes**

Dans le bâtiment chaux existe deux types de vannes, vannes manuelles et électrovannes, elles sont utilisées afin de permettre l'alimentation en différents liquides ou sa coupure pour les différents dispositifs utilisés dans le procédé, comme l'alimentation en eau de services des cuves de préparation...etc. ; les types et les rôles joués par vannes seront décrits dans le fonctionnement de procédé.

### **II.2.8 Instrumentation du procédé**

Le bâtiment est équipé de différents types d'instruments qui sont destinés à réaliser des fonctions bien spécifiques qui sont nécessaires pour le fonctionnement du procédé de neutralisation ; on trouve notamment :

- **Capteur de niveau ultrasonique**

On les utilise particulièrement pour la mesure du niveau de la préparation de lait de chaux dans chaque cuve de préparation.

- **Capteur de débit**

Ils sont utilisés pour la mesure des différents débits des liquides entrant et sortant du bâtiment chaux (l'eau de service et lait de chaux). Ils jouent un rôle très important dans le fonctionnement surtout pour la mesure de débit de l'eau de service alimentant les cuves pour la préparation de lait de chaux, à la concentration désirée, et la mesure de débit de lait de chaux injecté dans le réservoir d'eau traitée.

- **Détecteur de connexion**

Ils sont utilisés pour la vérification des différentes connexions effectuées entre les dispositifs du procédé, particulièrement ils permettent d'identifier la connexion du flexible de transport pneumatique sur les conduites de remplissage d'un silo et par conséquent, on peut identifier le silo qui est en remplissage.

- **Détecteur de pression**

Est un détecteur de pression haute, il est installé avec le surpresseur, il permet de détecter si la pression dans ce dernier est arrivée au niveau haut.

- **Détecteur fin de course (ouverture/fermeture)**

Chaque vanne installée dans le bâtiment est équipée de ce type de détecteur, ils permettent la détection de l'ouverture ou la fermeture de la vanne.

- **Détecteur de niveau (bas et haut)**

Les silos de stockage de la chaux sont tous équipés d'un détecteur de niveau pour la détection du niveau bas ou haut de remplissage du silo.

## **II.2.8 Armoires TBTF et TBTA**

Ces deux armoires sont installées dans une chambre séparée à l'intérieur du bâtiment chaux. La première c'est l'armoire de puissance (TBTF) qui contient les éléments de puissances (relais, contacteurs...etc.) qui commandent l'alimentation en énergie électrique de tous les équipements du bâtiment, et la deuxième c'est l'armoire

d'automate (TBTA) dans laquelle se trouve l'automate qui gère le procédé de neutralisation et ces accessoires.

### **II.3 Fonctionnement du procédé**

Le procédé est constitué de 2 filières identiques pour la préparation et le dosage du lait de chaux.

La chaux est chargée dans 4 silos (200 m<sup>3</sup> chacun) et diluée dans de l'eau de service. Le lait de chaux ainsi préparé est dosé par des pompes doseuses ensuite il est injecté dans les conduites de refoulement de pompes d'eau traitée, subissant une dilution secondaire, la solution de lait de chaux est injectée à la sortie des cuves de contact dans une zone de forte agitation hydraulique; de cette façon on assure un mélange optimal entre l'eau traitée et la solution de lait de chaux,

#### **II.3.1 Remplissage des silos de chaux**

Le remplissage des silos de stockage de la chaux peut se faire par deux façons, et cela en dépend de la manière du transport de la chaux.

##### **II.3.1.1 Remplissage par camion**

Le remplissage peut se faire directement par camion, l'opérateur connecte le flexible de dépotage du camion sur la conduite de remplissage de l'un des silos, lorsque l'opération commence, les équipements de dépoussiérage du silo se mettent en marche. Un détecteur identifie en supervision le silo en remplissage.

L'opérateur cesse l'alimentation lorsque le niveau max de remplissage d'un silo est atteint, il est indiqué par un capteur du niveau pour chaque silo (alarme en supervision et alarme locale au niveau du silo).

Le dépoussiéreur du silo s'arrête après une durée de fonctionnement T1 réglable en supervision, déclenché après déconnexion du flexible.

##### **II.3.1.2 Remplissage pneumatique par sacs**

La chaux en sortie de la dessacheuse est injectée dans les conduites de refoulement du surpresseur, puis un opérateur place le commutateur sur « DEPOTAGE » pour le poste de remplissage à utiliser, ensuite il connecte le flexible d'alimentation pneumatique sur la conduite de remplissage de l'un des silos. Un détecteur identifie le silo en remplissage. Les équipements de dépoussiérage du silo se mettent en marche.

Si le niveau haut de remplissage des silos n'est pas atteint, un Surpresseur démarre, ainsi que le ventilateur associé. Le remplissage prend fin :

- Par demande de l'opérateur, qui place le commutateur sur « ARRET »,
- Si aucun nouveau sac n'est détecté pendant une période déterminée T2,
- Sur détection du niveau haut du silo en remplissage.

### **II.3.1.3 Vidange de la dessacheuse**

Cette opération permet de vider la chaux déjà présente dans la trémie de la dessacheuse, sans ajouter des sacs. L'opérateur connecte le flexible d'alimentation pneumatique sur la conduite de remplissage de l'un des silos, un détecteur identifie le silo en remplissage et le dépoussiéreur du silo démarre ; ensuite l'opérateur place le commutateur sur « VIDANGE » pour le poste de remplissage qu'il va utiliser (A ou B). Le remplissage prend fin :

- Par demande de l'opérateur, qui place le commutateur sur « ARRET »,
- Sur détection du niveau haut du silo en remplissage.

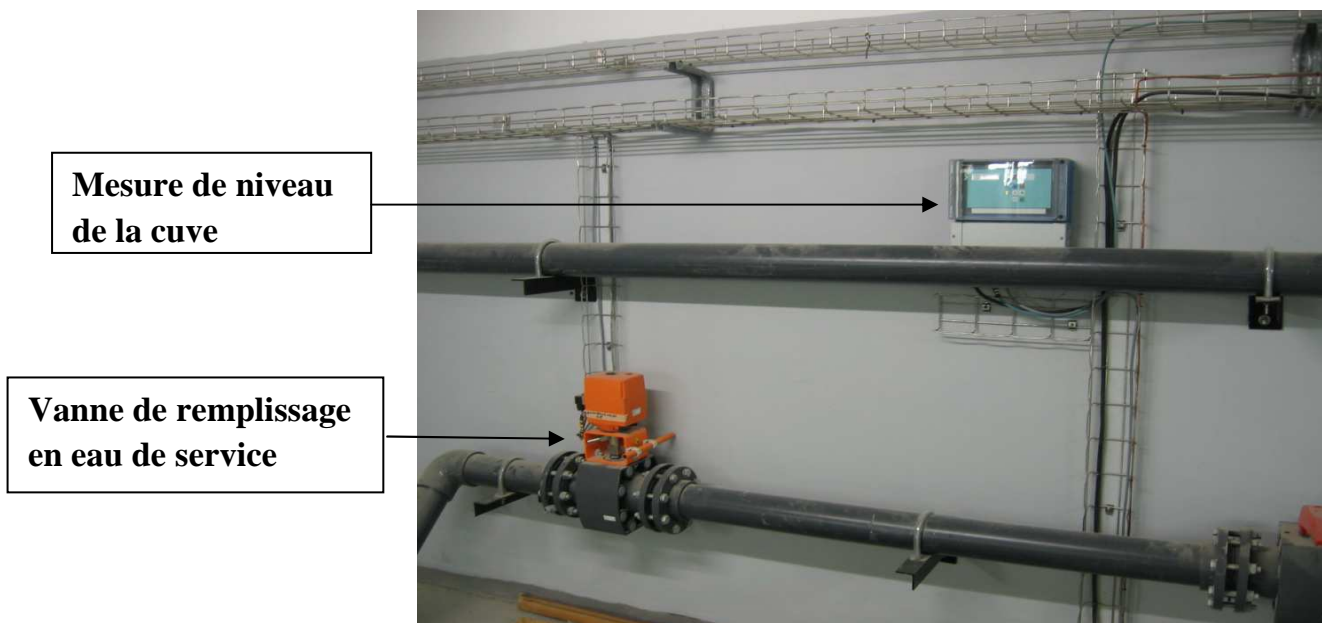
### **II.3.2 Préparation de la solution lait de chaux**

La préparation est décrite pour un silo et la cuve A. La séquence est identique pour les cuves B, C, D comme présenter dans la figure1.



L'opérateur déclenche la séquence de préparation en supervision via le bouton-poussoir « DEPART CYCLE » ou « REPRISE CYCLE » si une séquence précédente a été interrompue. Le fonctionnement se fait selon les étapes suivantes:

- La vanne d'eau traitée s'ouvre,
- Le soutirage de la chaux démarre avec le démarrage des équipements associés :
  - Injecteur,
  - Doseur,
  - Dévouteur.
- Le volume de chaux ajouté est initialisé,
- Arrêt du dévouteur et du doseur lorsque la quantité requise atteinte,
- Arrêt de l'injecteur après le temps de purge, pour vider l'injecteur,
- La vanne d'eau reste ouverte jusqu'à ce que le niveau atteigne le seuil max de la cuve (la vanne et l'élément de mesure de niveau sont présentés dans la figure II.2),
- La cuve est disponible pour le dosage.



**Figure II.2 : Instruments utilisés dans la préparation de lait de chaux.**

L'agitateur de la cuve fonctionne en permanence tant que le niveau de la solution dans la cuve est supérieur au seuil.

### II.3.3 Dosage de lait de chaux

Afin d'éviter la prise en masse de la chaux dans les conduites, il est nécessaire d'assurer en permanence une vitesse suffisante dans les conduites, pour cette raison, les pompes doseuses soutirent dans une boucle quasi-fermée.

Le lait de chaux est aspiré dans la cuve de répartition par des pompes centrifuges qui mettent la boucle en mouvement, ensuite la quantité nécessaire est soutirée par les pompes doseuses et le reste du lait de chaux est réinjecté dans la cuve.

#### II.3.3.1 Schéma général d'un poste de dosage

Le schéma synoptique du poste de dosage est donné par la figure II.3. Il est composé de :

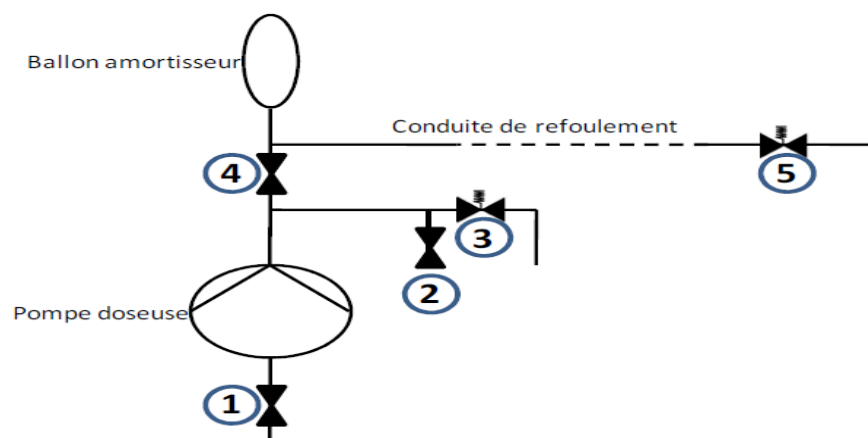


Figure II.3 : Schéma général d'un poste de dosage.

- La vanne d'isolement en aspiration (1) est ouverte pour permettre l'alimentation de la pompe,
- La vanne (2) permet la vidange de la conduite de refoulement ainsi que l'amorçage de la pompe lorsque la conduite de refoulement est vide,
- La vanne (3) permet l'évacuation de lait de chaux,

- La vanne (4) permet l'isolement de la pompe au refoulement,
- La soupape de sécurité (5) s'ouvre pour protéger la pompe contre une surpression due à un bouclage ou une vanne sur la conduite de refoulement.

Le débit de la pompe est pulsé (phases successives de refoulement et d'aspiration) et le ballon amortisseur a pour rôle d'amortir ces pulsations, sur la conduite de refoulement, en bout de ligne, la soupape (5) permet d'assurer une pression de 3 bars sur toute la conduite de refoulement, si cette surpression n'était pas présente, le liquide pourrait passer gravitairement par la pompe, à un débit non contrôlé. A ce schéma simplifié s'ajoutent différentes vannes permettant la vidange et le rinçage du système.

Dans la salle contenant les 6 pompes doseuses existantes est installé une autre pompe appelée vide-cave pour l'assèchement de cette salle afin de protéger ces pompes et les autres dispositifs existants.

### II.3.3.2 Réglage du dosage

Les pompes doseuses A, B et C sont affectées à la filière (1) et D, E, F à la filière (2). Le débit de lait de chaux est asservi au débit d'eau filtrée, avec un taux de traitement défini en supervision pour chaque filière. La quantité de chaux ajoutée est déterminée par le temps de marche et le débit du doseur :

- Le débit du doseur  $Q_d$  en kg/h est renseigné en supervision,
- Après un temps de marche  $t$  en s la quantité injectée est :

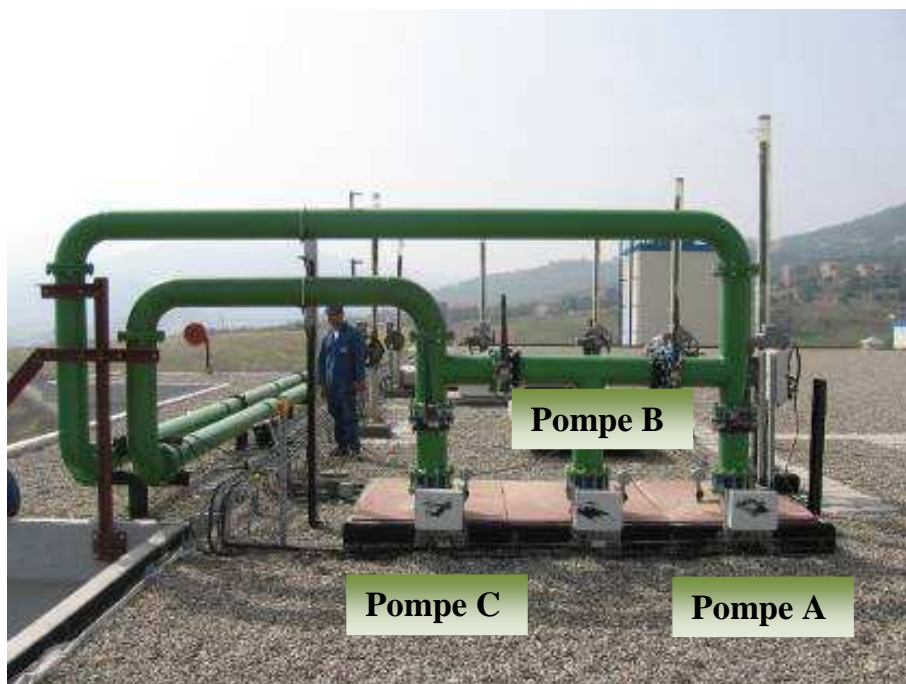
$$Mt = Q_d \cdot \frac{t}{3600} \quad \text{en kg}$$

- Le soutirage de chaux est terminé lorsque la quantité injectée atteint la quantité requise.

Pour la vérification régulière du débit des pompes doseuses, où s'il y a un doute sur le débit réel d'une pompe, son débit pourra être contrôlé à l'aide des cylindres de calibration prévus à cet effet.

### II.3.4 Dilution de lait de chaux

Trois pompes de dilution A, B, C de chaux (figure II.4) prélèvent l'eau de la chambre de sortie pour diluer la chaux dosée.



**Figure II.4 : Pompes de dilution.**

La pompe A est dédiée à la filière 1 et la pompe C à la filière 2, la pompe B pouvant être utilisée pour les deux filières, après manipulation des vannes et sélection en supervision.

La pompe de dilution de chaux affectée à chaque filière démarre quand une demande de dosage est faite pour la filière. Le débit d'eau de dilution est mesuré par un débitmètre électromagnétique pour chaque filière (figure II.5). Si ce débit devient inférieur au seuil fixé en supervision, alors que la pompe fonctionne, une alarme est déclenchée, pour alerter l'opérateur d'un éventuel dysfonctionnement des pompes.

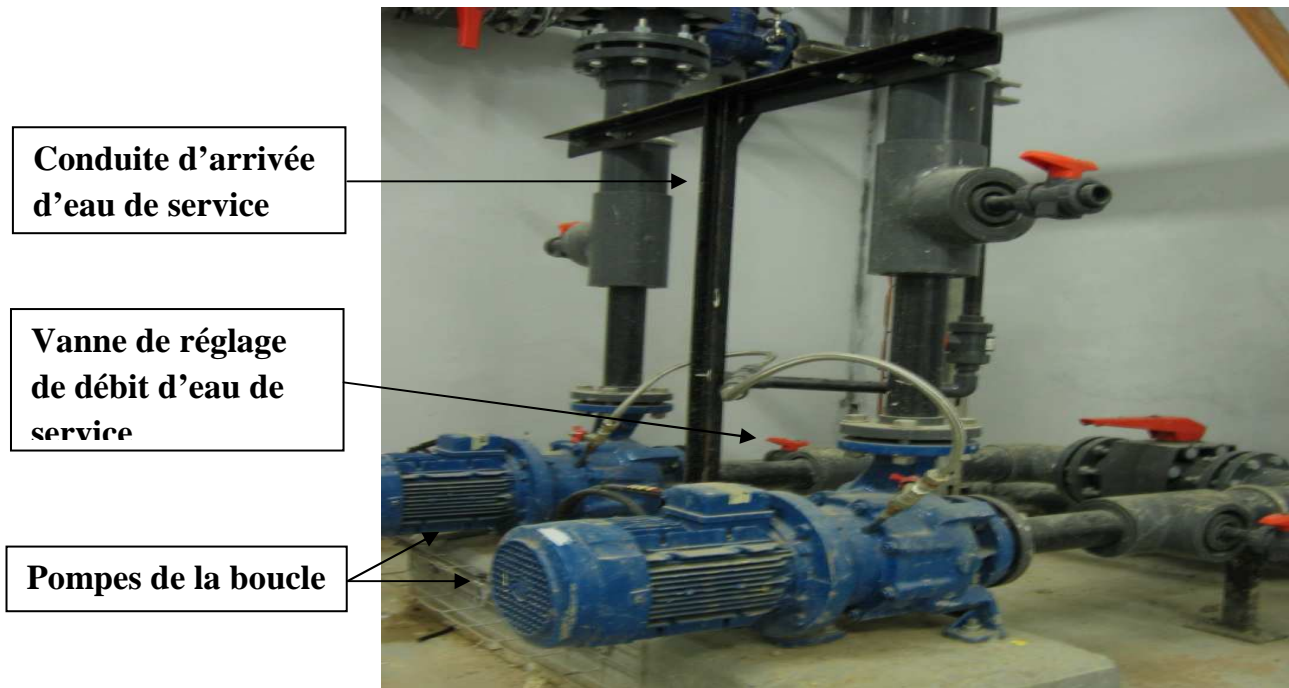


**Figure II.5 : Débitmètres de dilution de chaux filière 1/ filière 2.**

Le débit de chaux diluée pour chaque filière est déversé dans une goulotte située au dessus du déversoir de sortie des cuves de contact, légèrement en amont. La goulotte couvre la longueur du déversoir et est percée régulièrement d'ouverture latérales, afin d'assurer une bonne répartition du débit sur toute la longueur du déversoir.

### **II.3.5 Boucle de soutirage**

Comme le montre la figure II.6, la boucle de soutirage contient 2 pompes qui dirigent la chaux diluée avec l'eau de service vers la sortie des cuves de contact, ainsi que l'alimentation en eau de service de la garniture mécanique (tuyauteries, pompes...) qui est indispensable en permanence. Cette alimentation est contrôlée par des vannes manuelles.



**Figure II.6 : Composants de la boucle de soutirage.**

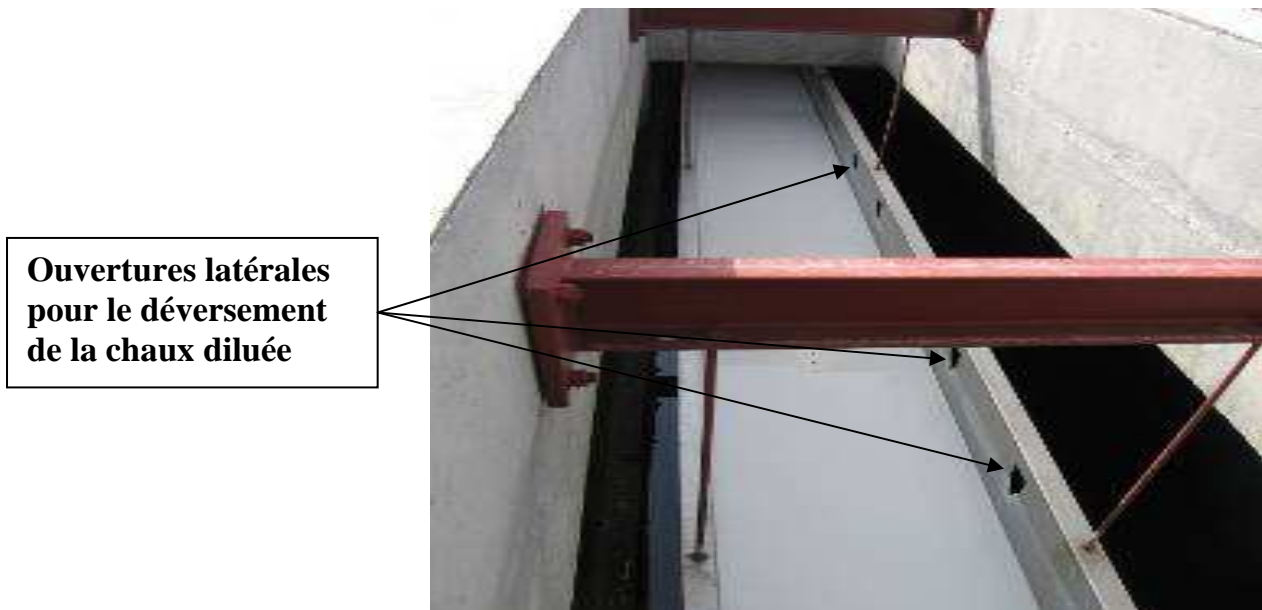
Une seule des deux pompes doit être en mode automatique (AUTO), la deuxième étant à l'arrêt, sa vanne d'isolement au refoulement fermée, la pompe disponible en AUTO démarre lorsque l'injection de lait de chaux est demandée pour une filière ou les deux. A l'arrêt du pompage, il est nécessaire de fermer la vanne d'arrivée d'eau de service.

La marche des pompes n'est pas autorisée si le détecteur de niveaux, dans les cuves de rétention de chaque pompe, détecte une fuite éventuelle, ou si le détecteur de débit placé sur la ligne commune d'alimentation en eau de service ne détecte pas de débit.

### **II.3.6 Injection de lait de chaux diluée**

L'opérateur demande l'injection de chaux, pour chaque filière, par un commutateur « AVEC LAIT DE CHAUX ». Le débit de chaux diluée pour chaque filière est déversé dans une goulotte située au dessus du déversoir de sortie des cuves de contact (figure II.7), légèrement en amont. La goulotte couvre la longueur du

déversoir et est percée régulièrement d'ouverture latérales, afin d'assurer une bonne répartition du débit sur toute la longueur du déversoir.



**Figure II.7 : Goulotte de déversement de la chaux diluée.**

#### **II.4 Identification du procédé de neutralisation**

Pour décrire le comportement dynamique du procédé, nous avons procédé par une expérience dans le laboratoire d'analyse de la station pour l'identifier un modèle mathématique pour le procédé de neutralisation.

Il s'agit donc d'appliquer des protocoles d'essai significatifs, sensibilisant les paramètres du modèle. C'est l'opération cruciale du projet, car elle nécessite beaucoup d'attention.

##### **II.4.1 Expérience réalisée**

Notre expérience consiste à relever les valeurs du pH de l'eau chaque deux secondes après injection de lait de chaux, et pour cela nous avons pris un litre (1L) d'eau dans un Bicher et lui injecte un volume de 200 ml du lait de chaux, d'une concentration de 10 mg/l préalablement préparée, et à l'aide d'un Ph-mètre et d'un

chronomètre nous avons pris les mesures, simultanément du Ph de l'eau et du temps lui correspond.

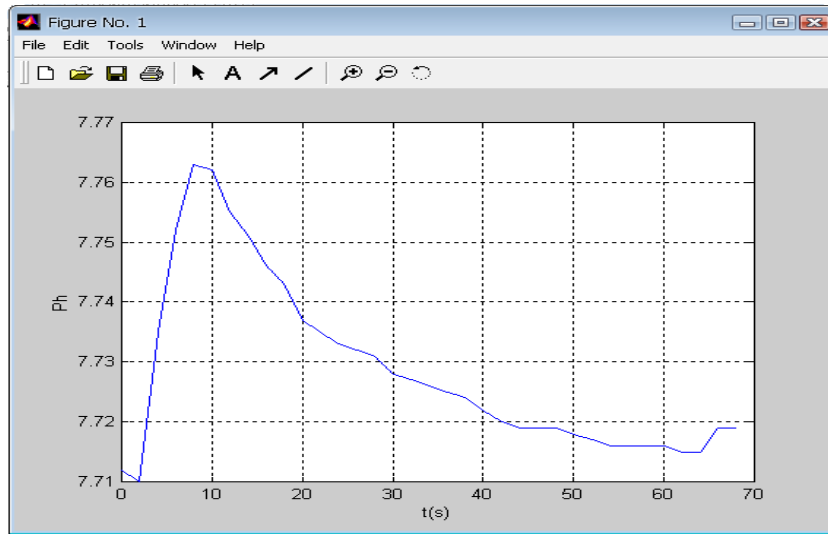
Notons que l'expérience a été réalisée manuellement, et nécessité beaucoup de précision, à cet effet nous avons fait le mieux possible pour réunir les conditions idéales acquérir des mesures fiables.

#### II.4.2 Résultats obtenus

Les valeurs du pH que nous avons obtenu en fonction du temps sont résumées dans le tableau suivant :

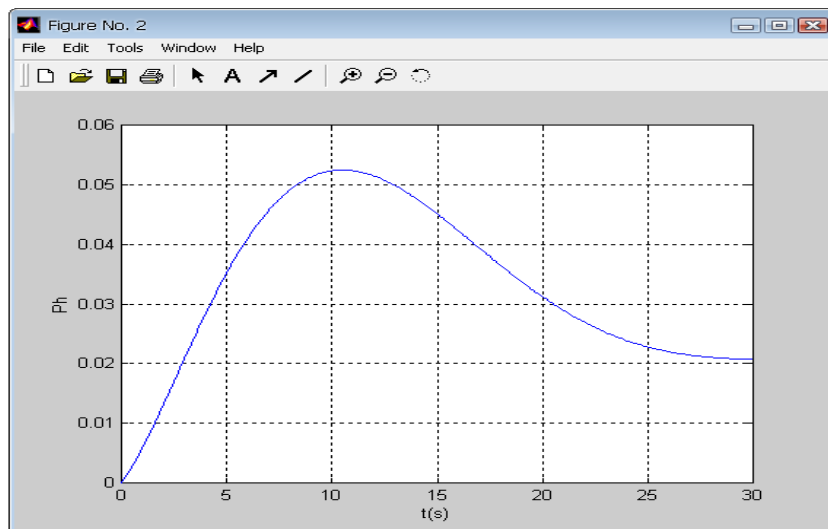
<b>Temps (S)</b>	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
<b>pH</b>	7.712	7.710	7.735	7.752	7.763	7.762	7.755	7.751	7.746	7.743
<b>Temps (S)</b>	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
<b>pH</b>	7.737	7.735	7.733	7.732	7.731	7.728	7.727	7.726	7.725	7.724
<b>Temps (S)</b>	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
<b>pH</b>	7.722	7.720	7.719	7.719	7.719	7.718	7.717	7.716	7.716	7.716
<b>Temps (S)</b>	60	62	64	66	68					
<b>pH</b>	7.715	7.715	7.715	7.719	7.719					

- L'évolution du pH en fonction du temps est donnée par la Figure II.8.



**Figure II.8 : Courbe réel de variation du pH en fonction du temps.**

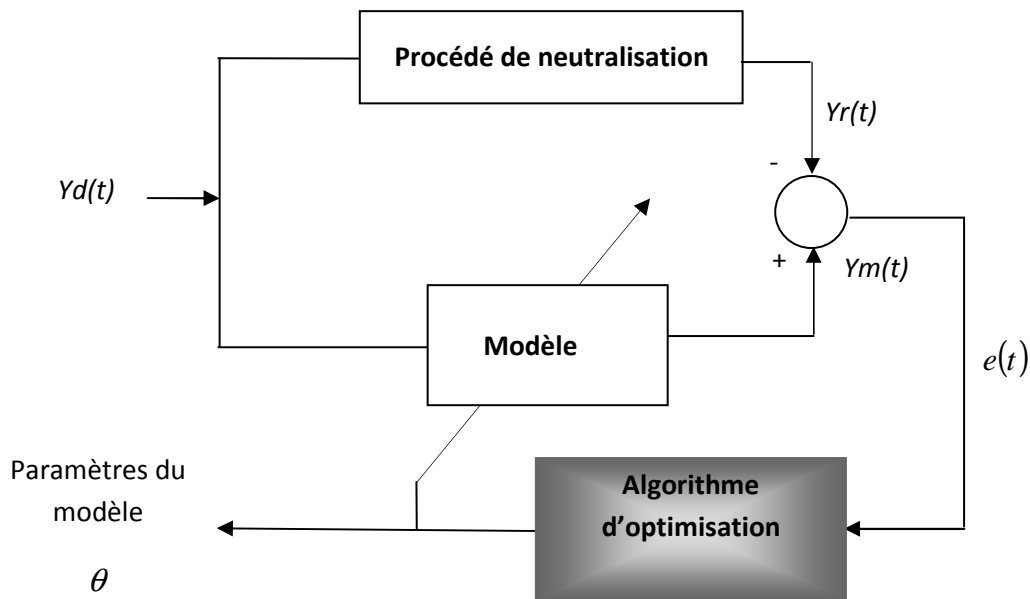
On remarque que la courbe obtenue ne permet pas de déduire la nature de notre système (système 1<sup>er</sup> ordre, 2<sup>ème</sup> ordre ou...etc) et pour ce faire, on a procédé au lissage des résultats afin d'avoir une courbe exploitable pour l'identification tout en ramenant les conditions initiales à zéro. Le résultat obtenu est donné par la Figure II.9, on constate que l'évolution du pH est proche de celle d'un élément du deuxième ordre oscillatoire.



**Figure II.9 : Courbe obtenu après le lissage.**

### II.4.3 Identification par la méthode du modèle

Pour identifier le modèle du procédé de neutralisation, on procède par la méthode du modèle schématisé sur la Figure II.10, en considérant les mesures obtenues après l'opération de lissage, il s'agit de minimiser l'erreur entre la sortie réelle du procédé (sortie mesurée) et celle estimée par le modèle.



**Figure II.10 : Estimation des paramètres du procédé de neutralisation.**

L'identification du modèle du procédé revient à rechercher les paramètres du modèle minimisant l'écart observé entre la sortie mesurée et celle prédite par le modèle.

La première étape consiste à choisir d'abord une structure pour le modèle du procédé. Ainsi, d'après le tracé de l'évolution de la sortie du procédé pour une entrée échelon, on constate que la réponse est oscillatoire, par conséquent la dynamique du procédé peut être décrite par un modèle de second ordre, c'est-à-dire :

$$G(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

Où  $\xi$  est le facteur d'amortissement,  $\omega_n$  est la pulsation naturelle du système et  $k$  est le gain.

Ainsi, pour identifier le modèle, on va minimiser l'écart suivant :

$$e(t) = y_m(t) - y_r(t) \quad (2)$$

Cela revient à considérer le critère suivant :

$$J = \int_0^{+\infty} e^2(t) dt \quad (3)$$

$Y_m$  représente les mesures obtenus à des instants d'échantillonnage, et  $y(t)$  représente la sortie du modèle échantillonné, c'est-à-dire pour une entrée du type échelon et dans le cas d'un système oscillatoire, la sortie du système (1) est donnée par l'expression suivante :

$$y_r(t) = k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot e^{(-\xi \cdot \omega_n \cdot t - m \cdot \xi) \cdot \sin((\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} \cdot t - m \cdot \xi) + \arccos(\xi))} \quad (4)$$

Par la suite on peut définir le problème d'optimisation suivant :

$$\min_{K, \omega_n, \xi} J(K, \omega_n, \xi) = \min_{K, \omega_n, \xi} \int_0^{+\infty} \left( y_m(t) - k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot e^{(-\xi \cdot \omega_n \cdot t - m \cdot \xi) \cdot \sin((\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} \cdot t - m \cdot \xi) + \arccos(\xi))} \right) dt \quad (5)$$

Comme les mesures sont prises à des instants bien déterminées  $t_k = k\Delta t$ , alors le problème (5), devient :

$$\min_{K, \omega_n, \xi} J(K, \omega_n, \xi) = \min_{K, \omega_n, \xi} \sum_{k=0}^N \left( y_m(k) - k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot k \Delta t - m \cdot \xi} \cdot \sin((\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2} \cdot k \Delta t - m \cdot \xi) + \arccos(\xi)) \right) \quad (6)$$

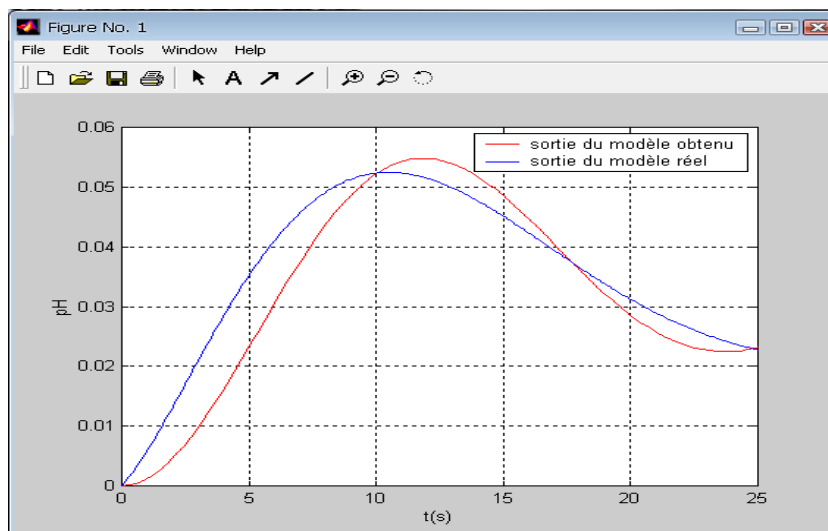
Ce problème d'optimisation non linéaire peut être résolu numériquement par un algorithme d'optimisation numérique en considérant une estimée de départ pour les paramètres du modèle. Dans notre cas on utilise une version de la méthode de quasi-Newton.

Pour cela un programme Matlab a été élaboré pour chercher la solution du problème d'optimisation (6). Les paramètres obtenus sont :  $k$ ,  $\omega_n$ , et  $\zeta$

Par la suite le modèle du procédé de neutralisation est :

$$G(s) = \frac{0.03446}{13.83s^2 + 1.231s + 1} \quad (7)$$

Pour valider le résultat obtenu, la sortie prédite par le modèle obtenu, et les mesures obtenues par l'opération de lissage sont représentées sur la Figure II.11. D'après les résultats obtenus, on remarque que le modèle identifié régit convenablement la dynamique du procédé mais présente un léger écart par rapport aux mesures réelles. Par conséquent, une technique de commande robuste par rapport aux erreurs de modélisation est indispensable.



**Figure II.11 : Courbes de sorties des deux modèles.**

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, une présentation générale de procédé de neutralisation de la station de traitement de TAKSEBT a été faite en présentant ces différents constituants, son fonctionnement et son identification. L'opération de neutralisation au sein de la station de traitement de TAKSEBT est réalisée par un opérateur. Cette opération peut être facilement automatisée en utilisant une boucle de régulation introduisant une loi de commande par moderne de nature numérique. Parmi les lois de commande modernes, on retrouve la commande par modèle interne réputée robuste aux erreurs de modélisation. Cette dernière sera adoptée dans la présente étude pour la régulation du Ph. La présentation détaillée de cette stratégie de commande fera l'objet du chapitre suivant.

# **CHAPITRE III**

## ***Commande à modèle interne du procédé de neutralisation***

## **Introduction**

Dans ce présent chapitre nous allons présenter la méthode de synthèse d'un régulateur à modèle interne et ses différentes caractéristiques. Cette méthode sera appliquée pour la détermination d'un régulateur à modèle interne pour le procédé réel de neutralisation, ensuite une simulation du ce régulateur sera effectuée afin de vérifier son efficacité et évaluer ces performances.

Après la détermination du régulateur qui correspond mieux à notre procédé, on va présenter les différents éléments de la boucle de régulation.

### **III.1 Régulateur à modèle interne**

La commande à modèle interne est l'une des méthodes recommandées pour l'obtention des performances désirées pour les systèmes asservis en présence de perturbations et des erreurs de modélisation.

Dans cette, on va présenter le correcteur à modèle interne que ses propriétés de robustesse le rendent très intéressant d'un point de vue pratique. Après une introduction exposant les avantages de ce type de correcteur, nous développons son principe et donnons quelques-unes des ses propriétés.

#### **III.1.1 Présentation et avantages du régulateur**

Lorsque le classique régulateur PID ne permet d'obtenir les performances désirées et qu'on ne dispose pas d'une puissance de calcul importante pour implanter une régulation prédictive standard, le régulateur à modèle interne ou CMI (Contrôle à Modèle Interne) s'avère être une approche intéressante.

En effet, ce type de correcteur est robuste, facile à régler en ligne et facile à maintenir c'est-à-dire à faire évoluer avec le procédé, car il contient un modèle explicite du procédé à commander ; De plus, une méthodologie de synthèse de ce correcteur a été développée ce qui rend la conception une démarche simple.

L'intérêt de l'approche CMI, est de montrer comment on peut réaliser un compromis performance/robustesse en fonction de l'incertitude des paramètres du modèle.

Pour des systèmes plus complexes, pour lesquels le correcteur PID équivalent n'existe pas, la synthèse d'une commande à modèle interne fournit un correcteur simple, offrant de bonnes performances, et pour lequel, la aussi, le compromis performance/robustesse peut être facilement choisi. On peut même imaginer de l'ajuster en ligne grâce à un paramètre de conception.

Nous présenterons ici la version discrète de l'approche CMI qui est appropriée pour notre projet, car la loi de commande sera implémentée sur un automate programmable, c'est-à-dire sous la forme discrète. L'approche continue est équivalente.

## III.2 Principe de la commande à modèle interne

### III.2.1 Présentation intuitive de la structure CMI

Le principe d'une régulation classique est donné par cette figure III.1:

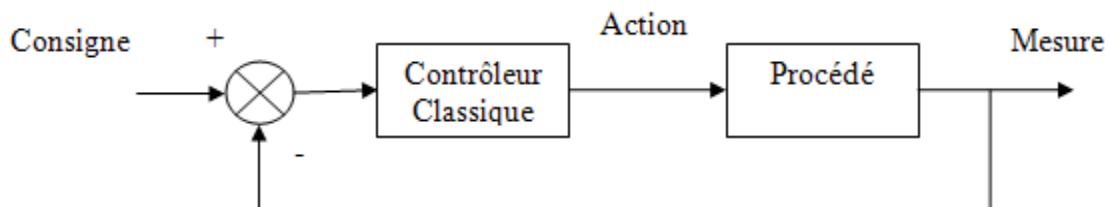
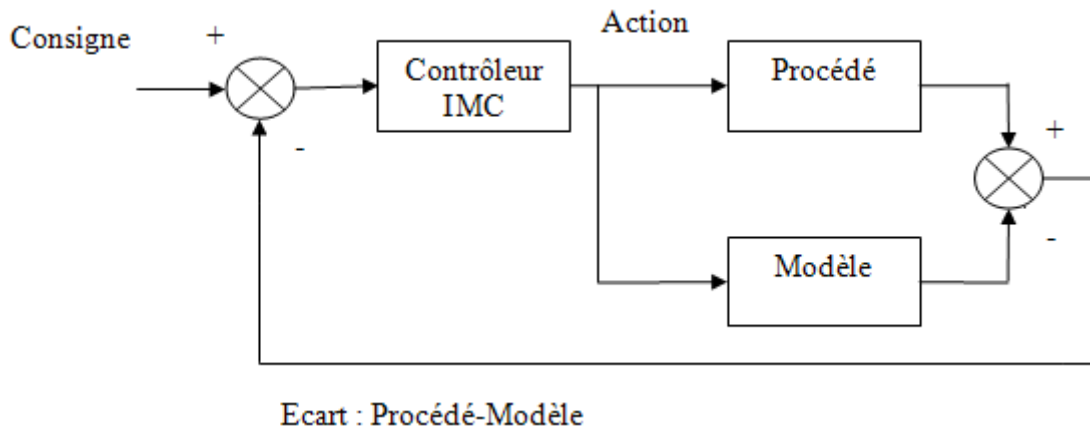


Figure III.2 : principe d'une régulation classique.

Et la structure du correcteur à modèle interne est donnée par cette figure:



**Figure III.3 : principe du correcteur à modèle interne.**

Dans la structure à modèle interne, la partie régulation est composée de deux parties.

- Le régulateur proprement dit,
- Le modèle du procédé.

Cette structure est à comparer à la structure classique. Dans la structure à modèle interne, l'effet des variables manipulées est soustrait de la sortie du procédé. Si l'on suppose que le modèle est parfait et que le système n'est soumis à aucune perturbation, alors le signal feedback, écart entre la sortie du procédé et celle du modèle, est identiquement nul.

Dans le cas du modèle parfait cet écart est égal aux perturbations. Dans le cadre de cette hypothèse du modèle parfait, le système peut être considéré comme étant en boucle ouverte et par conséquent :

- Les problèmes de stabilité rencontrés dans les boucles classiques disparaissent. Dans la suite on démontre que le système bouclé est stable si et seulement si le procédé et le correcteur CMI sont stables.

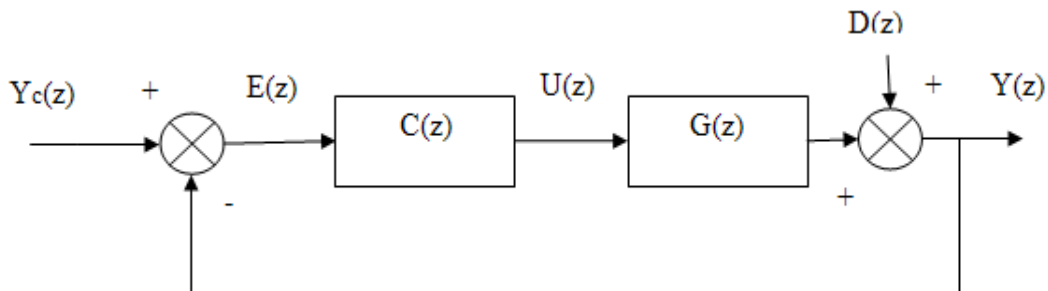
- Le rôle du correcteur est donc en quelque sorte d'inverser le modèle. En d'autres termes, le contrôleur CMI peut être vu comme un régulateur feedforward (par anticipation) en boucle ouverte et être calculé comme tel. Cependant, il n'a pas les inconvénients d'une boucle ouverte pure car le signal feedback, qui est égal à l'écart modèle procédé c'est-à-dire aux perturbations, permet de modifier le point de consigne de façon adéquate.

Lorsque le modèle ne permet de modéliser le procédé de façon parfaite le signal de feedback est dû à la fois aux perturbations et aux erreurs du modèle.

Celles-ci donnent lieu à un feedback au sens classique et des problèmes de stabilité peuvent se poser. On doit alors corriger le contrôleur feedforward idéal pour obtenir une certaine robustesse vis-à-vis des erreurs du modèle.

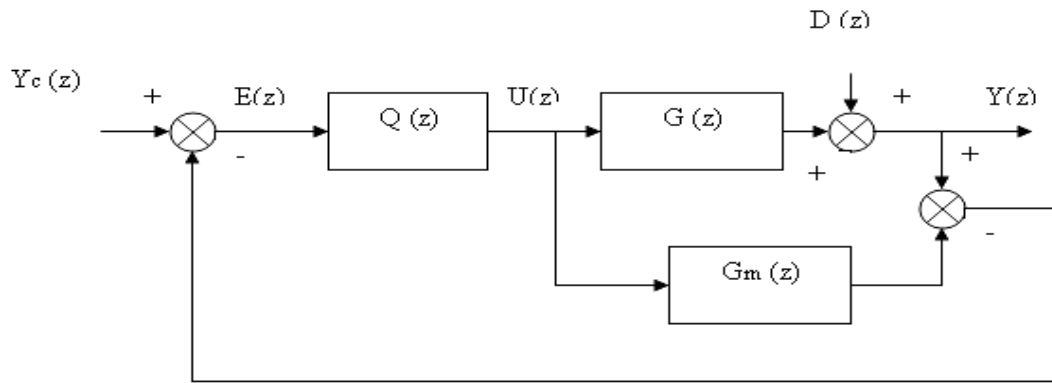
### III.2.2 Propriétés de la structure IMC

Le schéma bloc d'une régulation classique est donné par figure III.3 :



**Figure III.4: Schéma bloc d'une régulation classique.**

Et celui de la régulation à modèle interne :



**Figure III.5: Schéma bloc d'une régulation à modèle interne.**

Considérons le schéma bloc de la Figure (III.4), le transfert entre la consigne et la variable contrôlée peut s'obtenir de la façon suivante :

$$E(Z) = Y_c(Z) - (GQE(Z) - G_m QE(Z)) + D(Z) \quad (1)$$

$$Y(Z) = GQE(Z) + D(Z) \quad (2)$$

Soit :

$$E(z) = \frac{1}{1+Q(G-G_m)} (Y_c(z) - D(z)) \quad (3)$$

$$Y(z) = \frac{QG}{1+Q(G-G_m)} (Y_c(z) - D(z)) + D(z) \quad (4)$$

Ou encore :

$$Y(z) = \frac{QG}{1+Q(G-G_m)} Y_c(z) + \frac{1-QG_m}{1+Q(G-G_m)} D(z) \quad (5)$$

Rappelons que dans le cas d'une boucle classique, on avait :

$$Y(z) = \frac{CG}{1+CG} Y_c(z) + \frac{1}{1+CG} D(z) \quad (6)$$

A partir de ces relations, il est facile d'établir les correspondances entre la fonction de transfert du régulateur classique  $C(z)$  et celle du régulateur à modèle interne  $Q(z)$  :

$$C = \frac{Q}{1 - G_m Q} \quad (7)$$

$$Q = \frac{C}{1 + G_m C} \quad (8)$$

Par conséquent, les performances qui peuvent être obtenues avec un régulateur à modèle interne ne sont, à priori, ni meilleurs, ni moins bonnes que celles qui peuvent être obtenues avec une structure classique, puisque, comme le montrent les relations (7) et (8), ces structures sont équivalentes. L'intérêt de la structure à modèle interne réside, comme nous allons le voir, dans sa simplicité de conception et de mise en œuvre.

Examinons maintenant les transferts dans le cas où le modèle est parfait, c'est-à-dire  $G_m = G$ , on a :

$$Y(z) = QG Y_c(z) + (1 - QG)D(z) \quad (9)$$

Le système peut être vu comme étant en boucle ouverte. Par conséquent, la stabilité de l'ensemble procédé plus régulateur à modèle interne peut être déduite des fonctions de transfert de  $G$  et  $Q$ . On peut énoncer le résultat suivant :

- Si  $G$  est stable et si le modèle est parfait  $G_m = G$ , alors le système contrôlé par la structure à modèle interne est stable si et seulement si le régulateur  $Q$  est stable.

Ce résultat est à comparer à ce qu'on a pour une structure classique, où il n'est pas évident de déduire les propriétés de stabilité du système contrôlé en boucle fermée à partir du régulateur  $C$ .

Par ailleurs, la relation (8) est intéressante à considérer lors de la conception du régulateur à modèle interne  $Q$ . Elle fait apparaître clairement son aspect feedforward.

### III.3 Méthodologie de synthèse du régulateur

#### III.3.1 Principe de l'approche

Compte tenu des propriétés de la structure CMI, la synthèse d'un régulateur se réalise en deux étapes :

a) On fait l'hypothèse que le modèle est parfait. Dans ce cas, la synthèse du régulateur se réduit à la sélection d'un régulateur  $Q_0$  qui satisfait les performances spécifiées en boucle fermée puisque la stabilité globale est automatiquement assurée. Les critères de performance que l'on peut considérer sont :

- La minimisation de la somme du carré des erreurs entre la consigne et la variable contrôlée.
- Un temps de réponse donné.
- Pas de dépassement excessif.
- Pas de sollicitation excessive de la variable manipulée.
- Une erreur statique nulle pour des consignes en échelon ou en rampe.

b) Pour prendre en compte le fait que le modèle n'est pas parfait, le régulateur final est pris égal au régulateur idéal  $Q_0$  augmenté un filtre passe bas (en général de premier ordre), dont les paramètres (en général un seul) sont ajustés en ligne ou hors ligne pour réduire l'action sur la variable manipulée et augmenter la robustesse du contrôleur aux erreurs du modèle.

#### III.3.2 Synthèse de $Q_0$

Celle-ci est réalisée dans le cas où le modèle est parfait à partir de l'équation (8). L'idée est d'inverser la partie inversible du modèle du système. Pour se faire, la fonction de transfert est factorisée de façon à faire apparaître une partie non inversible. Ainsi, le modèle du système est factorisé comme suit :

$$G_m(z) = G_f(z) \cdot G_{NI}(z) \quad (10)$$

En particulier, la partie  $G_{NI}$  contient les retards et les zéros instables. La partie  $G_f$  est par définition inversible. Par conséquent, le contrôleur est donné par :

$$Q_0(z) = G^{-1}(z) \quad (11)$$

La réponse en boucle fermée du système est alors égale à :

$$Y(z) = G_{NI}(z) \cdot y_c(z) + (1 - G_{NI}(z)) \cdot D(z) \quad (12)$$

La fonction de transfert en boucle fermée représente donc la partie non inversible du modèle du système.

### III.3.3 Synthèse du filtre F

Le filtre  $F(z)$  est ajouté de façon à robustifier le système en boucle fermée vis-à-vis des erreurs de modèle. Celui-ci est souvent pris du premier ordre :

$$F(z) = \frac{(1-\alpha)z}{z-\alpha} \quad \text{avec} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (13)$$

Le filtre est ajouté à la sortie du régulateur et modifie la variable manipulée comme suit :

$$u_f(k) = \alpha u_f(k-1) + (1-\alpha)u_f(k) \quad (14)$$

Ses variations seront d'autant plus atténuées que la constante  $\alpha$  se rapproche de la valeur 1.

La réponse du système en boucle fermée avec le filtre s'écrit :

$$Y(z) = G_{NI}(z) \cdot f(z) \cdot y_c(z) + (1 - G_{NI}(z) \cdot f(z)) \cdot D(z) \quad (15)$$

Il apparaît donc que le filtre modifie la réponse en boucle fermée. Dans le cas de modèle parfait, il n'a pas d'effet sur la stabilité du système. En d'autre thème, si le régulateur nominal  $Q(z)$  est instable, il est important de noter que l'augmentation de la constante de filtre aura pour effet de ralentir le système, mais pas de le stabiliser.

Dans le cas d'un modèle imparfait, le filtre  $F(z)$  est utile pour compenser les erreurs de modèle, et donc pour améliorer la robustesse de la boucle de régulation. En effet, dans ce cas le transfert du système en boucle fermée s'écrit :

$$Y(z) = \frac{G^{-1}(z)_{NF}(z)}{1+[(G-G_m)G^{-1}(z)_m]G^{-1}(z)_{NF}} Y_c(z) + \frac{1-G^{-1}(z)_{NF}(z)}{1+[(G-G_m)G^{-1}(z)_m]G^{-1}(z)_{NF}(z)} D(z) \quad (16)$$

La stabilité du système en boucle fermé est assurée si les racines du polynôme caractéristique de la fonction de transfert suivante sont dans le cercle unité :

$$H(z) = \frac{G^{-1}(z)_{NF}(z)}{1+[(G-G_m)G(z)^{-1}_m]G^{-1}(z)_{NF}(z)} \quad (17)$$

### III.3.4 Règles standard de synthèse dans le cas d'un système stable

La méthodologie de conception, en deux étapes, présentée plus haut peut se formuler sous la forme d'un ensemble de règles qui s'appliquent à un modèle stable. Supposant que le procédé soit décrit par le modèle suivant :

$$G_M(z) = \frac{(Z - Z1)(Z - Z2) \dots (Z - Zn - 1)}{(Z - P1)(Z - P2) \dots (Z - Pn)} Z^{-r} \quad (18)$$

Ou :

**Zi**: Zéros du système.

**Pi**: Pôles du système.

**r**: Nombre de période d'échantillonnage égale au retard.

**n**: Ordre du système.

Comme on suppose que le modèle est stable, les pôles sont tel que  $|P_i| < 1$ .

- Règle 1 :

Les zéros de  $Q_0(z)$  sont les pôles de  $G(z)$ .

- Règle 2 :

Les pôles de  $Q_0(z)$  sont choisis comme suit :

- Les zéros de  $G(z)$  avec une partie réelle positive qui sont dans le cercle unité.
- Les inverses des zéros de  $G(z)$  avec une partie réelle positive qui sont à l'extérieur du cercle unité.
- Un pôle à l'origine pour chaque zéros à partie réelle négative.

- Règle 3 :

On ajoute un pôle à l'origine supplémentaire à  $Q_0(z)$  à cause du délai inhérent à l'échantillonnage.

- Règle 4 :

Le gain de  $Q_0(z)$  doit être choisi tel que  $Q_0(1) \cdot G(1) = 1$ .

- Règle 5 :

Ajouter un filtre à  $Q_0(z)$  pour prendre en compte les erreurs de modèle. En générale on prend :

$$F(z) = \frac{(1-\alpha)z}{z-\alpha} \quad (19)$$

Ce filtre permet d'adoucir la réponse, d'atténuer la sollicitation de la variable manipulée et de réduire la sensibilité du contrôleur aux erreurs de modèle.

### III.4 Synthèse de la loi de commande

La mise en œuvre de la commande à modèle interne est systématique, et suit comme nous l'avons vu, une procédure structurée et efficace ce qui rend sa conception simple et assure ses propriétés de robustesse. Dans ce qui suit, on va appliquer cette méthode au modèle du procédé de neutralisation identifié afin de lui synthétiser un régulateur à modèle interne. On suppose que le modèle est parfait

#### III.4.1 Synthèse de $Q_0$

- Fonction de transfert discrète du modèle obtenue dans le chapitre II :

$$G(z) = \frac{0.004588z + 0.004321}{z^2 - 1.578z + 0.8369} \quad (20)$$

- Pôles et zéros de  $G(z)$  :

➤ Pôles :  $P_1 = 0.7892 + 0.4627i$  et  $P_2 = 0.7892 - 0.4627i$

➤ Zéros :  $Z = -0.9419$

- paramètres du  $Q_0$  :

Les paramètres à calculer sont : les zéros, les pôles et le gain, et à la fin on établira la fonction de transfert  $Q_0$

➤ Zéros :

On appliquant la première règle (voir la page.. de ce chapitre), les zéros du régulateur se sont les pôles du modèle :

$$z_1 = 0.7892 + 0.4627i \text{ et } z_2 = 0.7892 - 0.4627i$$

➤ Pôles :

Selon la deuxième et la troisième règle, on aura un pôle double à l'origine :

$$P = z^2$$

➤ Gain du  $Q_0$  :

Le gain est calculé tel que :  $Q_0(1) * G(1) = 1$  selon la règle 4 .

$$K = \frac{1}{0.004588 + 0.004321} = 112.2460$$

➤ Donc la fonction de transfert  $Q_0$  est :

$$Q_0 = \frac{z^2 - 1.578z + 0.8369}{z^2} * 112.2460 \quad (21)$$

### III.4.2 Synthèse du filtre F

La fonction de transfert discrète du filtre est :

$$F(z) = \frac{(1 - \alpha)z}{z - \alpha} \quad (22)$$

Avec  $0 < \alpha < 1$

Le paramètre  $\alpha$  peut être ajusté de façon à modifier le temps de réponse du procédé et aussi la valeur de la commande  $u(z)$ .  $\alpha$  doit être choisi en tenant compte des différentes contraintes à satisfaire.

Pour le procédé étudié, après des essais de simulation réalisé sur Matlab, nous avons opté pour un ( $\alpha = 0.5$ ), donc la structure du filtre  $F(z)$ :

$$F(z) = \frac{0.5z}{z - 0.5} \quad (23)$$

### III.4.3 Structure finale du régulateur

Après la synthèse de  $Q_0$  et le filtre, le régulateur à modèle interne (IMC) aura pour forme finale :

$$Q = \frac{z^2 - 1.578z + 0.8369}{z^2} \cdot 0.1122460 \cdot \frac{0.5z}{z - 0.5} \quad (24)$$

### III.5 Simulation du régulateur obtenu

Afin d'évaluer les performances du régulateur à modèle interne (IMC) et ces avantages, nous avons eu recours à des essais de simulation en utilisant logiciel MATLAB, et c'en tenant compte des trois états possibles pour le système (sans perturbations, avec une perturbation qui augmente le pH et avec une perturbation qui diminue le pH).

Dans les tests de simulation, nous avons considéré que le modèle est idéal; donc le procédé aura la même fonction de transfert que le modèle.

Les schémas de simulation sont composés des éléments suivants :

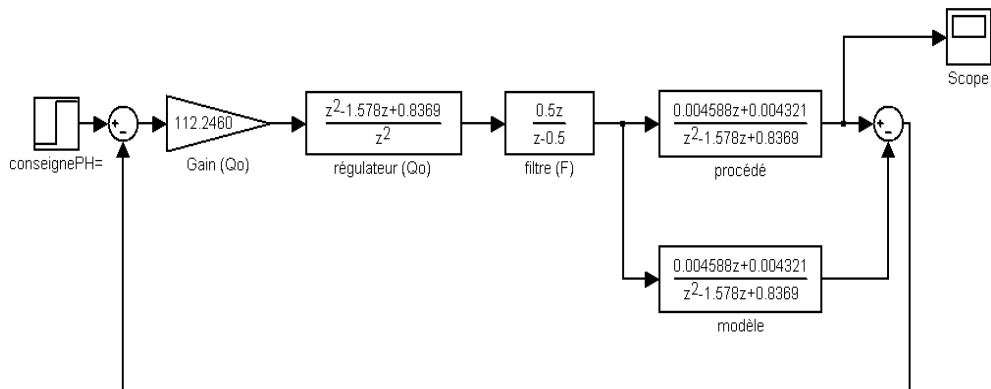
- Entrées échelon : pour la consigne et la perturbation,
- Gain : la valeur numérique du gain de régulateur,
- Fonctions de transfert : pour le régulateur  $Q_0$ , le filtre  $F(z)$ , le modèle et la la perturbation.

Pour les deux schémas qui possèdent une perturbation, elle sera représentée sous forme d'un échelon avec en amont une fonction de transfert, pour éviter d'avoir une perturbation brusque (échelon seul) et cela pour se rapproché beaucoup plus de sa nature réelle.

### III.5.1 Système sans perturbation

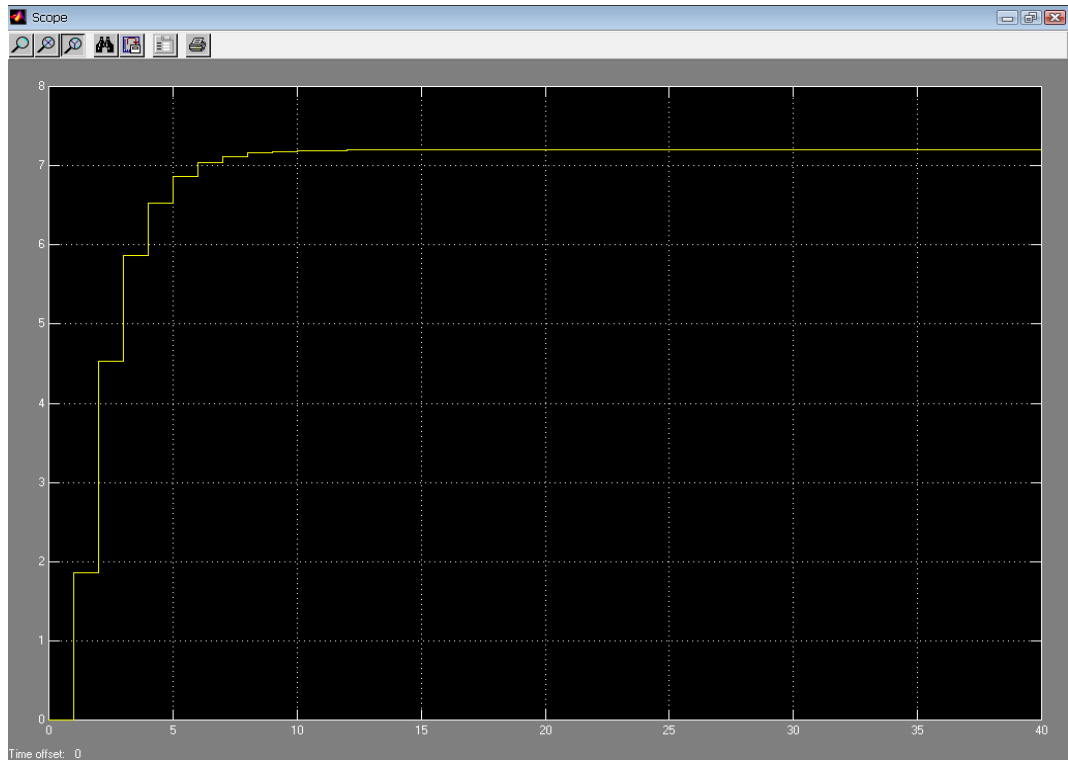
Dans ce cas, le système est considéré comme parfait sans aucune perturbation.

- Schéma de simulation du système :



**Figure III.6: Schéma de simulation sans perturbation.**

- Visualisation graphique de la sortie du procédé :



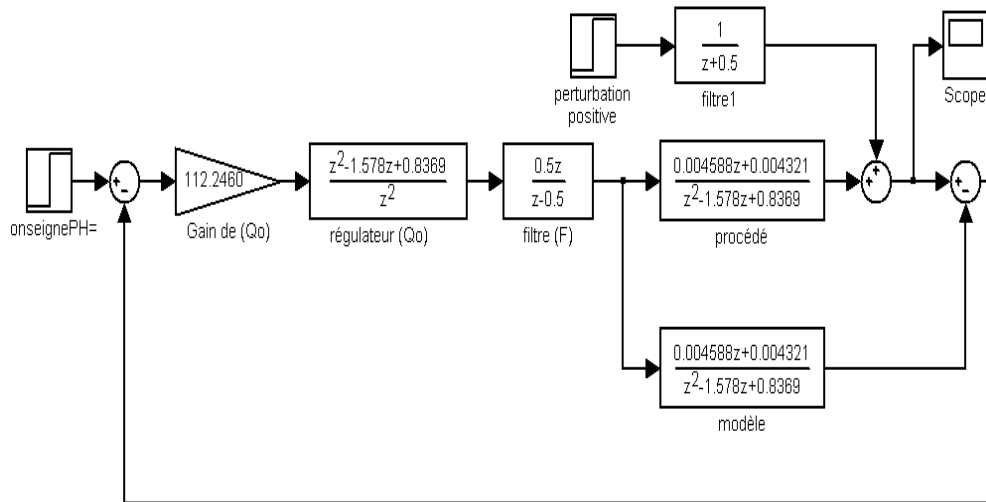
**Figure III.7: Courbe de la sortie du procédé sans perturbation.**

Dans la figure précédente on remarque que la sortie du procédé (pH) augmente jusqu'à atteindre la valeur 7.2 qui est celle de la consigne ; une fois cette valeur atteinte, la sortie reste constante. Donc pour un système sans perturbation le régulateur aura comme objectif d'amène la sortie du procédé jusqu'à atteindre la valeur désirée et la maintenir fixe.

### **III.5.2 Système avec une perturbation qui augmente le pH (positive)**

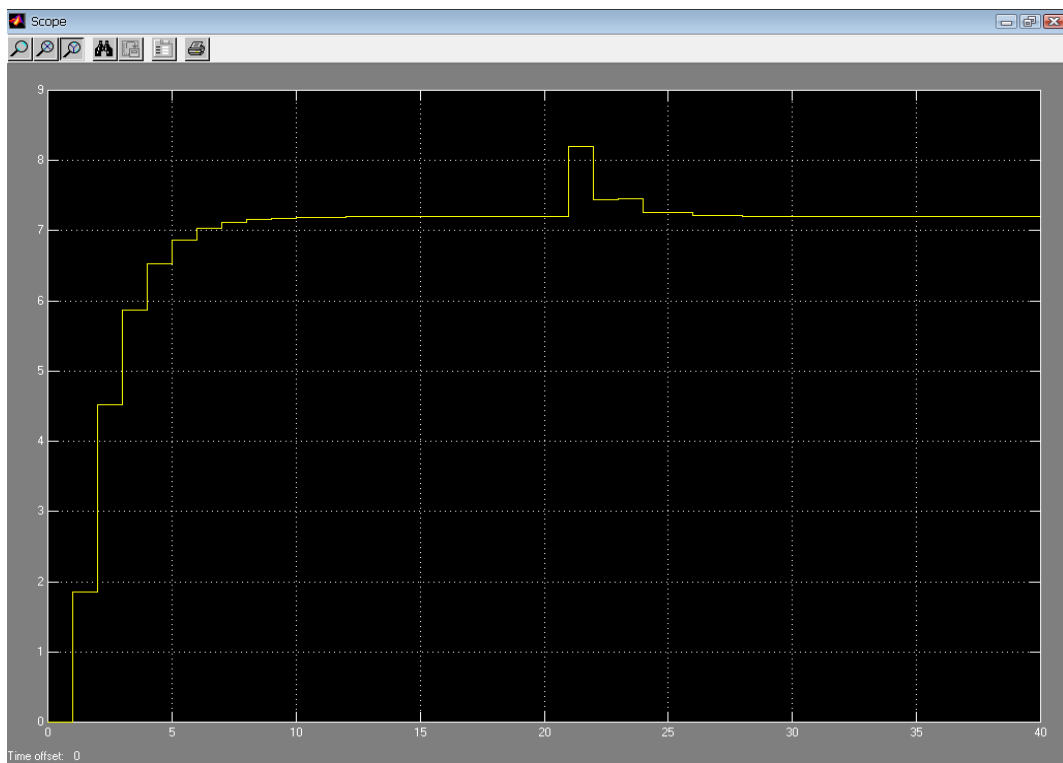
Le système est soumis à une perturbation qui va augmenter la valeur de sortie du procédé (pH).

- Schéma de simulation du système :



**Figure III.8: Schéma de simulation avec une perturbation positive.**

- Visualisation graphique de la sortie du procédé :



**Figure III.8: Courbe de la sortie du procédé avec une perturbation positive.**

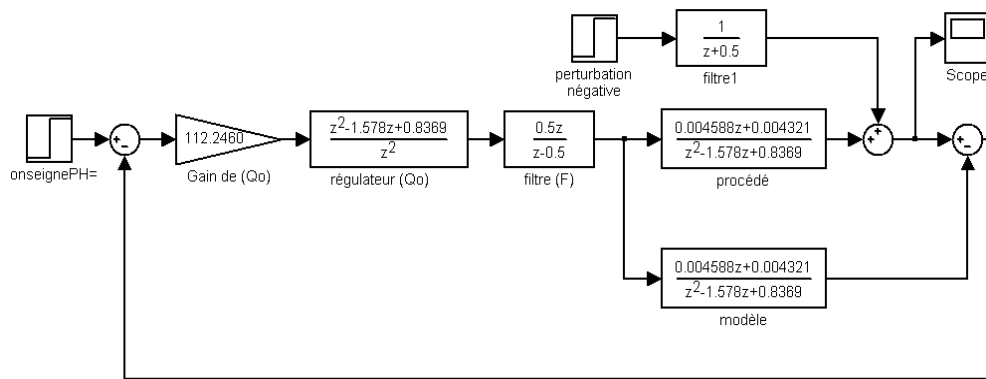
Quant à la deuxième simulation, on remarque bien dans la figure au-dessus, qu'après l'application de la perturbation, la sortie du procédé augmente et dépasse la

valeur désiré, à cet instant le régulateur réagit de façon a ce que la sortie diminue jusqu'a atteindre sa valeur finale qui est égale toujours à la consigne.

### III.5.3 Système avec une perturbation qui diminue le pH (négative)

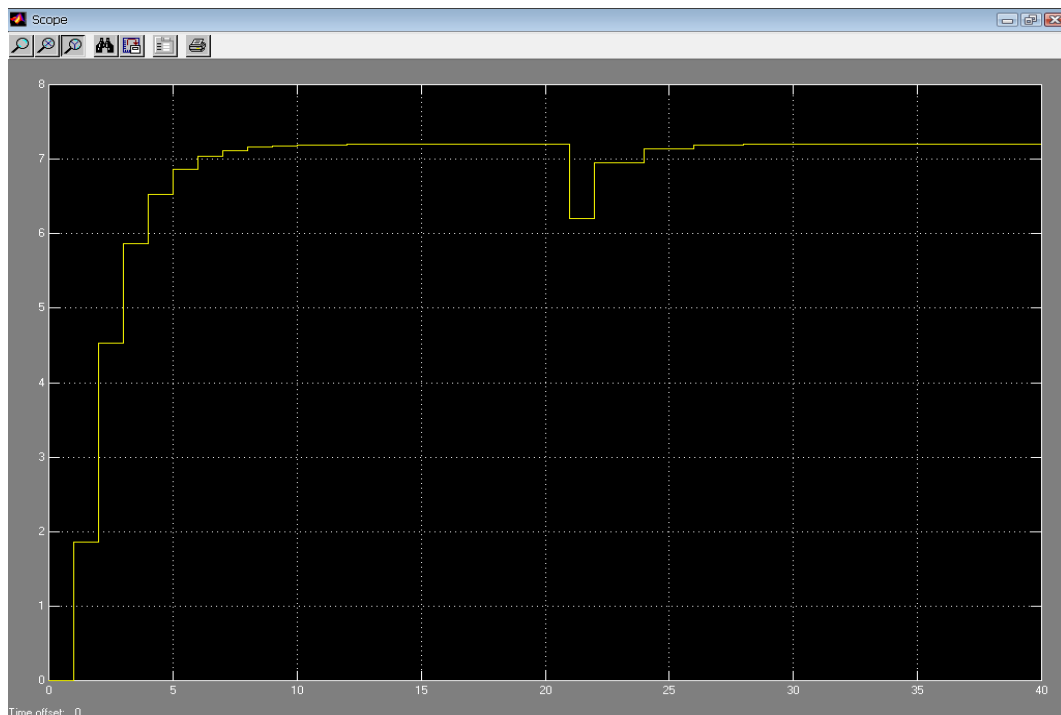
Dans ce cas l'application de la perturbation va diminuer la valeur de la sortie du procédé (pH).

- Schéma de simulation du système :



**Figure III.9: Schéma de simulation avec une perturbation négative.**

- Visualisation graphique de la sortie du procédé :



### Figure III.10: Courbe de la sortie du procédé avec une perturbation négative.

Pour le troisième cas, on remarque que la valeur du pH est passée au-dessous de la valeur désirée après l'application de perturbation ; ce qui fait intervenir le régulateur pour rejeter l'effet de la perturbation et ramener le pH à la valeur désirée.

#### III.5.4 Résultat des simulations

Ces trois simulations réalisées nous amènent à déduire que le régulateur à modèle interne satisfait bien les contraintes souhaités, et quelque soit la nature de la perturbation, le régulateur réagit d'une manière robuste et efficace pour réajuster la sortie du système et l'amener à la valeur désirée.

#### III.6 Boucle de régulation adoptée pour l'opération de neutralisation

La boucle de régulation adoptée pour contrôler l'injection du lait de chaux à la sortie des cuves de contact est représentée dans la figure suivante :

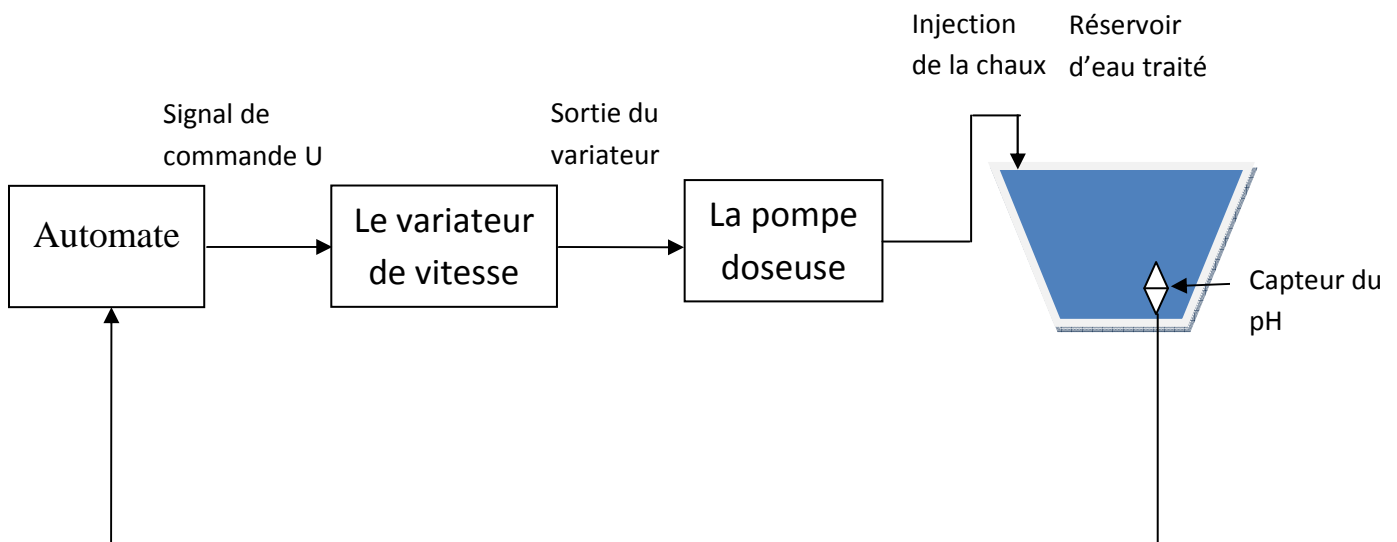


Figure III.11: Schéma de la boucle de régulation.

L'arrêt, le démarrage et la vitesse de la pompe doseuse est effectuée en fonction du signal de variateur de vitesse, qui lui aussi reçoit une commande de l'automate, cette commande permet de déterminer le volume du lait de chaux à injecter pour la neutralisation et cela en fonction de la valeur du pH de l'eau dans le réservoir. Dans ce qui suit nous allons donner une description générale de ces différents éléments

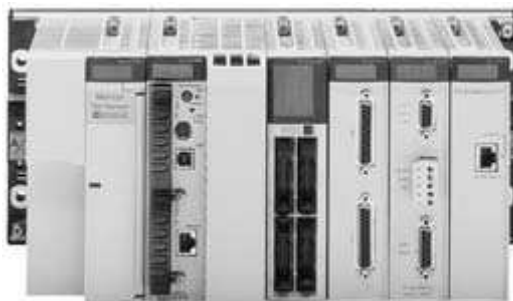
### **III.6.1 Eléments constituant la boucle de régulation**

#### **III.6.1.1 Automates programmables industriels (A.P.I)**

Les automates programmables industriels (A.P.I) sont des appareils électroniques adaptés à l'utilisation dans différents types d'industrie, ils réalisent des fonctions d'automatisme afin d'assurer la commande des pré-actionneurs et d'actionneurs à partir d'informations logiques, analogiques, ou numériques qu'il reçoivent d'un opérateur ou des différents types de capteurs et détecteurs installés.

#### **III.6.1.2 L'automate programmable qui gère le bâtiment chaud**

Le bâtiment chaud est équipé d'un automate programmable Schneider TSX 572623, ces types A.P.I ont été développés pour être conformes aux principales normes internationales concernant les équipements électroniques d'automatismes industriels en général :



**Figure III.12: L'automate TSX 572623.**

Ces automates ont une structure modulaire, ils sont équipés d'un processeur TSX P 572623 qui gère l'ensemble de la station automate constituée de modules

d'entrées/sorties TOR, de modules analogiques et de modules métier (comptage, commande d'axes, commande pas à pas, communication,...) qui sont répartis sur un ou plusieurs racks.

### III.6.1.2 Variateurs de vitesses ALTIVAR 31 (ATV 31)

Les variateurs Altivar 31 (ATV31) sont des variateurs de vitesses pour moteurs asynchrones triphasés à cage. Les Altivar 31 sont robustes, peu encombrants, facile à mettre en œuvre, Ils intègrent des fonctions répondant aux applications les plus courantes.



**Figure III.13: variateur de vitesse ATV 31.**

Le variateur Altivar 31 est livré avec radiateur pour ambiances normales et enveloppes aérées. Il est possible d'en monter plusieurs variateurs côte à côte, ce qui entraîne un gain de place important.

#### III.6.1.2.1 Principe général

Le variateur Altivar 31 est alimenté à tension et fréquence fixes par le réseau, il assure au moteur, en fonction des exigences de vitesse une alimentation en courant alternatif à tension et fréquence variables.

Pour alimenter convenablement un moteur asynchrone à couple constant quelle que soit la vitesse, l'ATV31 assure l'évolution simultanée dans les mêmes proportions de la tension et la fréquence alimentant le moteur et cela pour maintenir le flux constant dans le moteur.

#### **III.6.1.2.2 Fonctionnement de L'ATV 31**

L'ATV 31 est un convertisseur de fréquence, il utilise le principe de la variation de la fréquence des sinusoïdes et de la tension afin de faire maintenir un couple constant à toutes les fréquences.

Cette technique permet de faire varier la vitesse des machines asynchrones entre deux valeurs limites prédéterminées (V max et V min) de manière régulière, sans à-coup, y compris à basse vitesse. Les principales fonctions intégrées par le variateur sont les suivantes :

- Protections moteur et variateur,
- 16 vitesses présélectionnées,
- Consignes et régulateur PI,
- Rattrapage automatique avec recherche de vitesse et redémarrage automatique,
- Configuration des défauts et des types d'arrêts,
- Sauvegarde de la configuration dans le variateur.

#### **III.6.1.2.3 Option de dialogue et commande du variateur**

Le variateur Altivar 31 (ATV 31) communique avec les éléments suivants :

- **Terminal déporté :**

L'Altivar 31 peut être connecté à un terminal déporté qui donne accès aux mêmes fonctions que l'afficheur et les touches intégrées au variateur. Il peut être utilisé :

- Pour commander, régler et configurer le variateur à distance,
- Pour la signalisation visible à distance,
- Pour mémoriser et télécharger des configurations, 4 fichiers de configuration sont mémorisables.

- **Atelier logiciel PowerSuite**

Les solutions de dialogue évolué PowerSuite présentent les avantages suivant :

- Affichage des messages en clair et en plusieurs langues,
- Préparation du travail en bureau d'études sans que l'Altivar soit connecté au PC,
- Sauvegarde des configurations et réglages sur disquette ou disque dur, ainsi que leur téléchargement dans le variateur,
- Possibilité d'édition sur support papier.

- **Bridge Ethernet/Modbus :**

L'altivar 31 peut se connecter sur un réseau Ethernet via un bridge Ethernet/Modbus. La communication via Ethernet est dédiée principalement aux applications de :

- Coordination entre automates programmables,
- Supervision locale ou centralisée,
- Communication avec l'informatique de gestion de production,
- Communication avec des entrées/sorties distantes,
- Communication avec des produits de contrôle industriel.

- **Passerelles de communication :**

L'altivar 31 peut se connecter sur différents bus de communication par l'intermédiaire des passerelles suivantes :

- Fipio/Modbus,
- DeviceNet/Modbus,
- Profibus DP/Modbus.

### III.6.1.2.4 Branchement de l'ATV31

Pour le bon fonctionnement du variateur, il faut assurer le branchement convenable des entrées/sortie à leurs places destiné, dans le schéma ci-dessous, on va illustrer un exemple de branchement du l'ATV31 à une pompe doseuse du bâtiment chaud.

- Schéma du branchement :

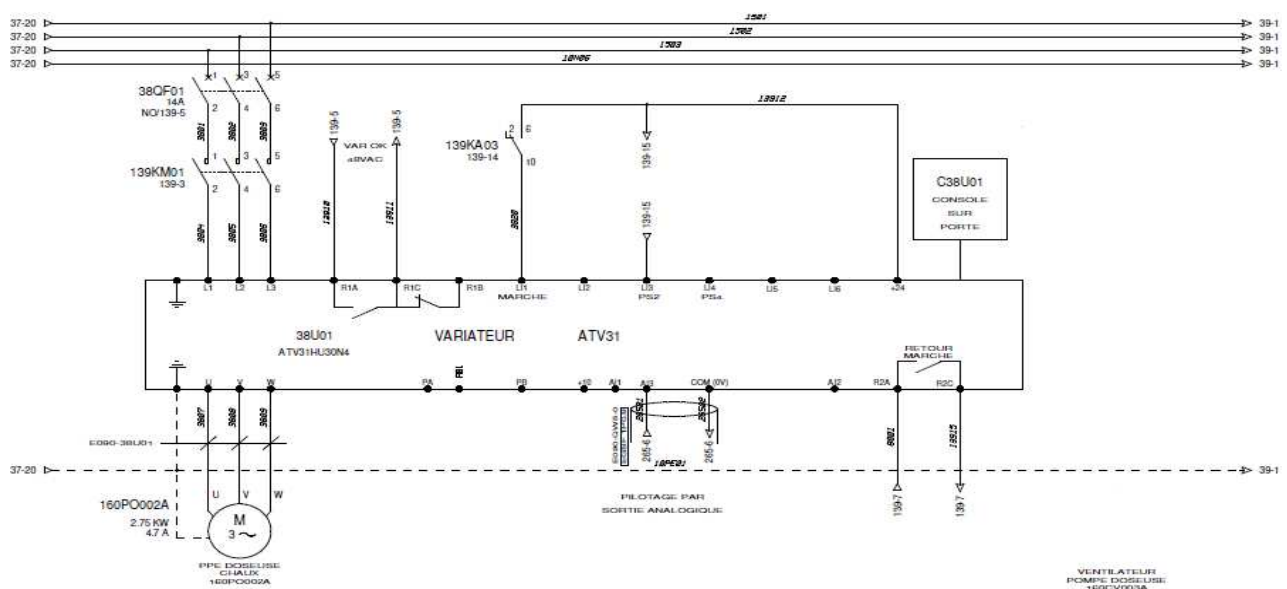


Figure III.14: schéma de branchement de l'ATV 31.

### IV.6.1.3 Pompes doseuses

Les pompes doseuses rendent de bons et loyaux services depuis plusieurs décennies ; leur rôle est de doser un produit pour le mélanger à un autre. Ces pompes appartiennent à la grande famille des pompes volumétriques, qui comportent des chambres internes par lesquelles passe le liquide pompé en deux phases (aspiration et refoulement), et pour contrôler leurs débits, il suffit d'agir sur le volume du ou des chambres internes de la pompe et/ou sur sa vitesse de rotation.

#### **IV.6.1.3.1 Paramètres de choix d'une pompe doseuse**

Le choix d'une pompe doseuse et de son installation se fait en fonction de multiples paramètres :

- En premier lieu, les caractéristiques de débit et de pression permettent une première sélection. En effet le produit de ces deux paramètres a la dimension d'une puissance et celle-ci détermine le modèle de pompe à proposer.
- La viscosité du produit pompé permet alors une seconde sélection.
- Le critère de faisabilité est le N.P.S.H., sigle de « Net Positive Suction Head ». Les possibilités pour une pompe de fonctionner à l'aspiration sont d'une grande importance quand la hauteur géométrique d'aspiration est importante, mais aussi quand le liquide est volatile, ou à température élevée, ou stocké sous vide, etc....

#### **IV.6.1.3.2 Type de pompes doseuses utilisées dans le bâtiment chaud**

Dans ce bâtiment sont utilisés des pompes doseuses Milton Roy Europe, leurs caractéristiques principales est d'avoir par construction une cylindrée réglable. Elles appartiennent à la famille des pompes volumétriques alternatives, et à la différence des pompes de type centrifuge qui engendrent une vitesse, les pompes doseuses Milton Roy Europe engendrent une cylindrée ; à une cylindrée donnée, la variation de la vitesse de rotation de la pompe pour une vitesse donnée permet d'avoir un dosage assez précis du liquide.

#### **IV.6.1.3.3 Réglage des seuils des pompes doseuses Milton Roy Europe**

Les pompes doseuse en régulation marchent à une vitesse dépendant des consignes envoyées aux variateurs de vitesses qui les commandent, et ils délivrent un débit proportionnel à la vitesse dans un domaine de débit limité. Avant la mise en marche de la pompe et selon la documentation du fournisseur, on doit régler le seuil  $Q_{min}$  (débit minimal, correspondant à la vitesse minimal) et le seuil  $Q_{max}$  (débit maximal, correspondant à la vitesse maximal).

#### IV.6.1.4 Capteur et transmetteur du pH

La mesure et la transmission de la valeur du pH de l'eau dans le réservoir est effectuée à l'aide d'une sonde pH et un transmetteur représentés respectivement dans les figures suivante :



Figure III.15.a: Sonde de pH.



Figure III.15.b: Transmetteur de pH.

##### IV.6.1.4.1 Capteur pHD sc par dérivation pH et analyseur ORP

Le pH de la plupart des applications est compris entre 2,5 et 12,5. Le capteur pHD™ par dérivation pH, électrode en verre de gamme large, convient particulièrement bien à cette plage de mesure ainsi il est utilisé dans la station pour la mesure et transmission de la valeur pH dans différents étapes de traitement de l'eau.

Le principe de la mesure du pH est lié au couple rédox qui fait intervenir les protons et l'hydrogène :



Le potentiel pris par une électrode baignant dans un flux d'hydrogène à la pression atmosphérique est donc proportionnel à l'opposé du pH de la solution. Le facteur de proportionnalité est -59,1 mV par unité de pH.

#### **IV.6.1.4.2 Transmetteur**

Le transmetteur est doté d'un boîtier protégé et traité anticorrosion afin de résister au brouillard salin et à l'acide sulfhydrique. La mesure momentanée et la température de l'échantillon sont affichées sur le transmetteur si un seul capteur est connecté ou deux mesures et les températures correspondantes sont affichées si deux capteurs sont connectés.

Les accessoires en option, tels que le jeu de montage pour le capteur, sont fournis avec les instructions selon les desiderata de l'utilisateur. Il existe différentes possibilités de montage, ce qui permet d'adapter le capteur à de nombreuses applications.

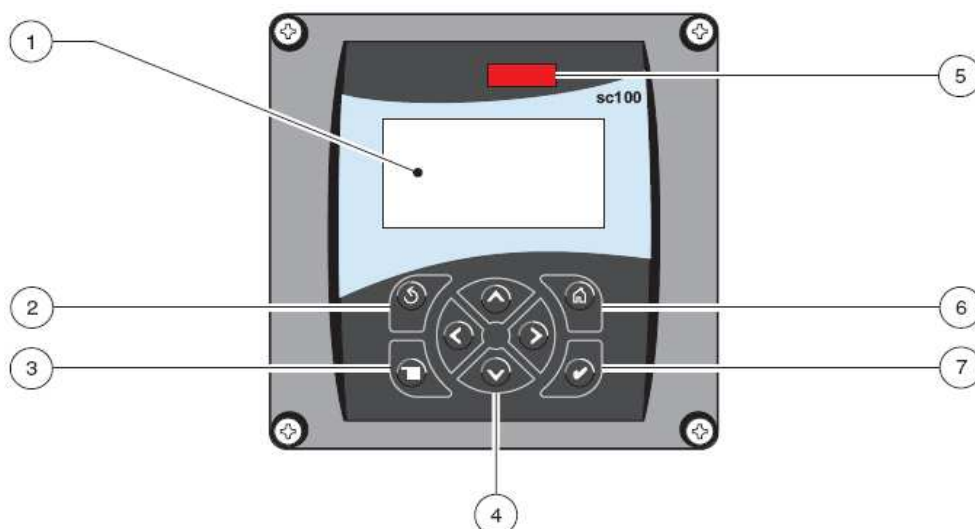
- **Réseau numérique**

Le transmetteur sc100 est équipé de deux interfaces numériques : réseau numérique et infrarouge. Chacune de ces deux interfaces permet d'accéder aux données setup, aux mesures et aux archives données et événements.

- **Commande du transmetteur**

- **Clavier**

La figure ci-dessous représentant la face avant du transmetteur.



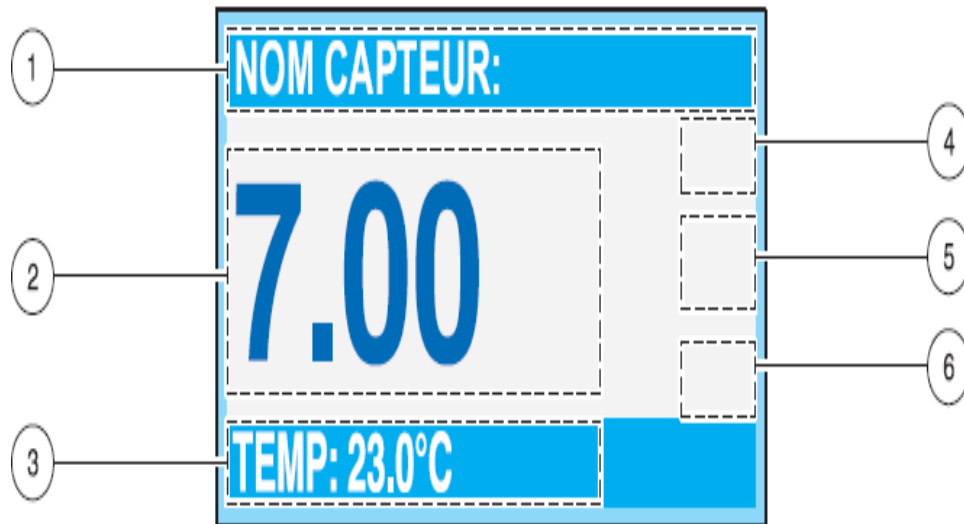
**Figure 19: clavier du transmetteur.**

Le clavier représenté dans la figure précédente est composé de huit touches :

- (1) : Ecran,
- (2) : Touche RETOUR,
- (3) : Touche MENU,
- (4) : Touches fléchées VERT LA DROIT, VERS LA GAUCHE,  
VERT, LE HAUT et VERT LE BAS,
- (5) : TOUCHE HOME,
- (6) : TOUCHE ENTRER.

- **Lecture des mesures**

Pendant le mode mesure, les mesures correspondantes sont affichées sur l'écran du transmetteur si un capteur est connecté. L'affichage clignote, au moment de la mise en service, en cas d'une erreur capteur, si la fonction « SORTIES MEMO » est activée et pendant l'étalonnage du capteur.



**Figure 17: Ecran d'affichage du transmetteur.**

- (1) : Ligne Statut, indique le nom du capteur et le statut de relais. Le nom du relais est affiché si ce dernier est sous tension,
- (2) : Mesure principale,
- (3) : Deuxième mesure (si deux capteurs sont connectés),
- (4) : Paramètres,
- (5) : Zone d'affichage du signal d'alarme,
- (6) : Unité de mesure.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le régulateur à modèle interne (IMC). Ainsi une étude théorique sur la synthèse de ce régulateur a été faite ensuite l'application de la commande à modèle interne pour le processus de neutralisation a été explicitée. Pour évaluer ces performances des tests de simulation ont été réalisés avec le logiciel Matlab.

A la fin nous avons présenté la boucle de régulation du pH et ces différents éléments.



# **CHAPITRE IV**

## ***Programmation de la loi de commande en PL7***

## **Introduction**

L'automatisation complète du procédé de neutralisation sera présentée dans ce chapitre. Après avoir vérifié la robustesse de notre régulateur par simulation. La loi de commande synthétisée dans le chapitre précédent sera implantée dans l'automate programmable installé dans le bâtiment chaud. La programmation sera réalisée par le logiciel de programmation PL7 qui est spécifique aux automates Schneider.

### **IV.1 Logiciel de programmation PL7**

#### **IV.1.1 Présentation générale**

Le PL7 est un logiciel de conception des programmes et de configuration pour automates programmable SHNEIDER. Il existe en 4 versions qui sont :

- Le logiciel PL7 Junior est le logiciel de programmation des automates TSX 37 et TSX/PMX/PCX 57 fonctionnant sous Windows,
- Le logiciel PL7 Micro ne permet de programmer que les automates TSX 37.
- Le logiciel PL7 Pro offre, en plus des fonctionnalités du logiciel PL7 Junior, la possibilité de créer des blocs fonction utilisateur DFB (Derived Function block) et des écrans d'exploitation.
- Le logiciel PL7 Prodyn est un outil d'exploitation (conduite, diagnostic, maintenance) pour les automates TSX 37 et TSX/PMX/PCX 57. Il ne permet pas la création ou la modification d'application

#### **IV.1.2 Langages de programmation en PL7**

Le PL7 dispose de 4 langages de programmation qu'on peut utiliser pour la conception de nos programmes, on trouve :

### IV.1.2.1 Langage graphique

C'est le langage à contacts (LD). Il s'agit de la transcription du traitement combinatoire à des schémas à relais. Il offre les symboles graphiques de base : contacts, bobines, blocs. L'écriture de calculs numériques est possible à l'intérieur de blocs opérations.

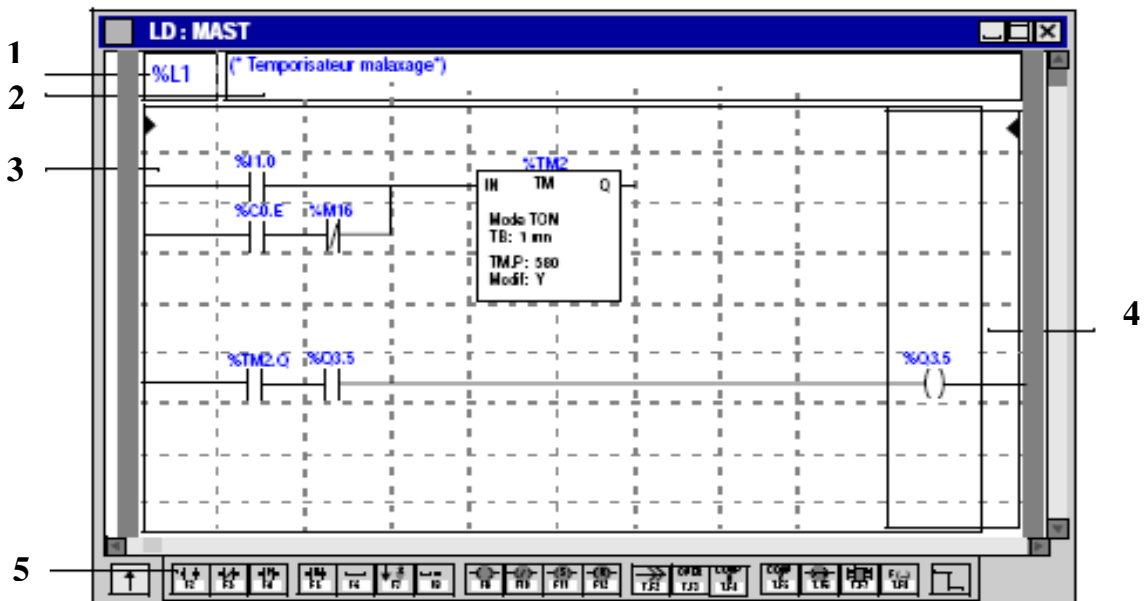


Figure IV.1: exemple d'un programme à contact (LD).

Dans l'exemple de la figure IV.1, on a:

- (1) zone étiquette : elle permet de saisir une étiquette,
- (2) zone commentaire : elle permet de saisir un commentaire,
- (3) zone teste : elle localise les éléments tels que contact, bloc fonction,
- (4) zone action : elle localise les éléments tels que bobines, bloc opération,
- (5) Platte d'éléments graphique : elle permet d'accéder directement aux différents symboles graphiques du langage.

### IV.1.2.2 Langage booléen

Le langage liste d'instructions (IL) est un langage machine qui permet l'écriture de traitements logiques et numériques sous forme booléen.

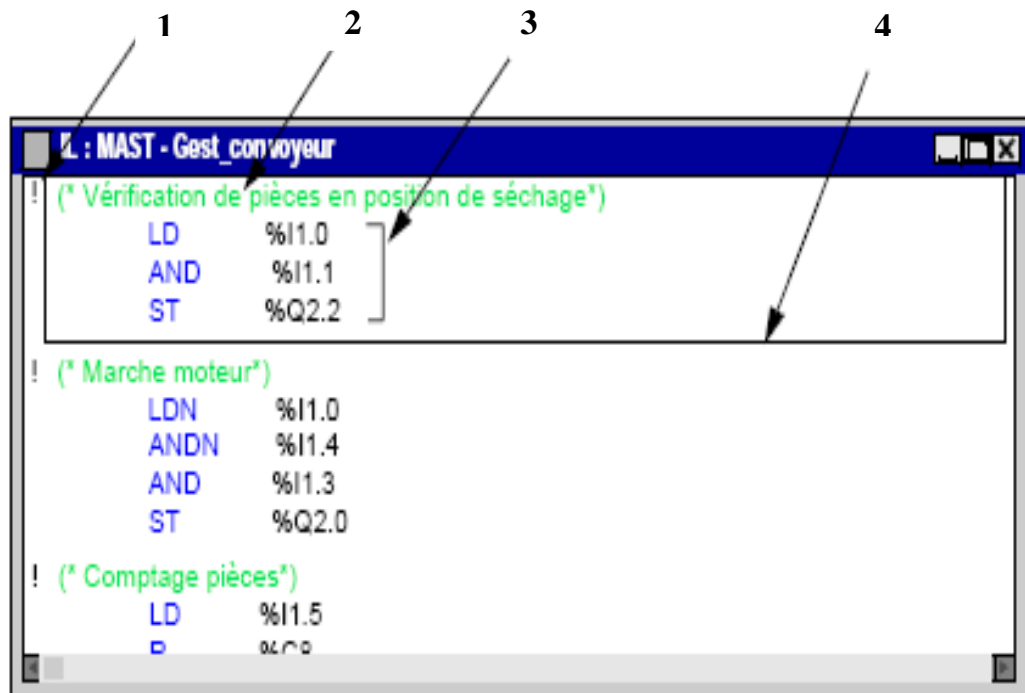


Figure IV.2: exemple d'un programme en liste.

L'exemple de la figure IV.2 comprend :

- (1) Symbole de début de phrase,
- (2) zone commentaire délimitée par (\* \*),
- (3) liste d'instructions (IL),
- (4) délimitation de la phrase courante.

### IV.1.2.3 Langage littéral structuré (ST)

C'est un langage de type "informatique" permettant l'écriture structurée de traitements logiques et numériques.

```
ST : MAST - Sequentielle - Pri

! (* Mise à jour du voyant cycle en cours *)
IIF %M0 THEN
SET %M18;
ELSE RESET %M18;
END_IF;

! (* RAZ application *)
IF RE %M21 THEN
SET %S0;
END_IF;
```

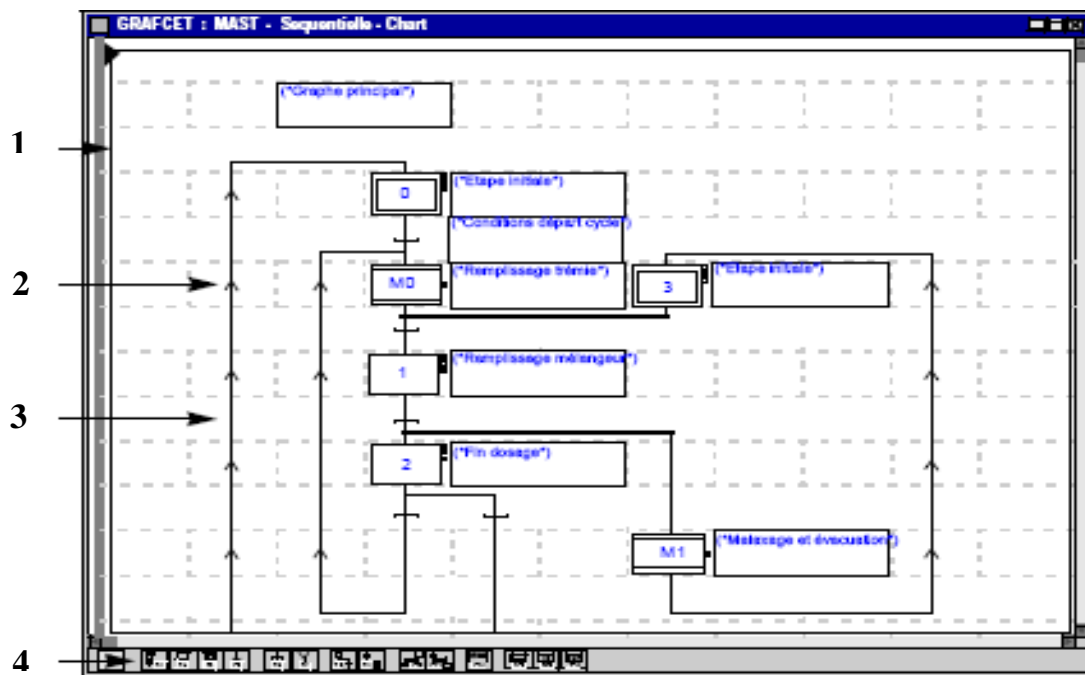
**Figure IV.3: exemple d'un programme en littéral structuré.**

Un exemple de ce langage est donné par la figure IV.3 ou on trouve :

- (1) Symbole de début de phrase,
- (2) zone commentaire délimitée par (\* \*),
- (3) Instructions littéral structuré (ST),
- (4) délimitation de la phrase courante.

#### IV.1.2.4 Le langage Grafcet

Il permet de représenter graphiquement et de façon structurée le fonctionnement d'un automate séquentiel.



**Figure IV.4 : Exemple d'un programme en Grafcet.**

Ce type de langage est illustré par la figure IV.4 qui correspond:

- (1) Page Grafcet, elle permet de réaliser le graphe,
- (2) Ligne d'étapes, elle permet de saisir une étape, macro-étape, commentaire,
- (3) Ligne de transitions, elle permet de saisir les transitions, commentaires,....,
- (4) Palette d'éléments graphiques, elle permet d'accéder aux différents symboles graphiques du langage.

#### IV.1.3 Notion de variables

Une variable est une entité mémoire dont le contenu peut être modifié par le programme en cours d'exécution. On peut trouver plusieurs types de variables :

Type d'objet	Description	Exemple
Objet mémoire	Bits internes destinés à mémoriser les états intermédiaires en cours de programme. Ils sont rangés à l'intérieur de l'espace « données » dans une même zone mémoire.	%MW 797 Nombre de produit évacué dans un poste
Objet système	Bits système, ces bits assurent plusieurs fonctions : <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Certains renseignent l'état du système par lecture des bits %SI.</li> <li>➤ D'autres permettent d'agir sur l'application (initialisation Grafcet,...).</li> </ul>	%SW5 (cont_afficheur_api_01)
Constantes	Ces informations de lecture ou d'écriture sont échangées à la demande de l'application. Elles sont des constante interne	%KW30 (Affichage en pixels de valeur "1" sur l'afficheur de l'API)
Objets Grafcet	Ces bits permettent de connaître l'état des étapes du Grafcet.	%X0 (Etape_Grafcet_0)
FB Prédéfinis	Fonction bloc prédéfini ou DFB Les bits de bloc fonction correspondent aux sorties des blocs fonction standard ou instance de DFB. Ces sorties peuvent être soit câblées directement, soit exploitées en tant qu'objet (temporisation,...).	%TM0 (contrôle du temps après la première saisie de la dizaine)

E/S	Ces bits sont les « images logiques » des états électriques des entrées/sorties (I/Q). Ils sont rangés dans la mémoire de données et sont mis à jour à chaque scrutation de la tâche dans laquelle ils sont configurés	%Q /4.0/5.0 (Sortie du vérin de chargement : approvisionnement d'un produit)
-----	--	---

#### IV.1.4 Notion d'un repère

Tous les objets manipulés ont un repère qui commence par le caractère % suivi de lettres ou de nombre qui nous informe sur son identité.

%	M ou S ou K ou X	X (ou vide) ou W ou D ou F
Caractérise un symbole	Type d'objet : <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ M : objet mémoire</li> <li>➤ S : objet système</li> <li>➤ K : constante</li> </ul>	Il s'agit du type de donnée avec lequel on travaille, et par conséquent la place mémoire que la variable va prendre. <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ X : booléen</li> <li>➤ W : WORD, ce type prend 16 bits en mémoire</li> <li>➤ D : DOUBLE WORD, prend 32 bits en mémoire.</li> <li>➤ F : FLOTTANT, nombre à virgule, il occupe 32 bits en mémoire</li> </ul>

#### IV.1.5 Adressage des entrées/sorties des esclaves sur le bus AS-i

Ces bits sont des images logiques des états électriques d'entrées/sorties des automates esclaves gérés par un automate maître.

Exemple de syntaxe : %I\4.0\n.i ou %Q\4.0\n.i

%	I ou Q	4.0	N	i
Symbole	Type d'objet <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ I : entrée</li> <li>➤ Q : sortie</li> </ul>	Adressage <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 4 : n° de position du module As-i dans le TSX micro.</li> <li>➤ 0 : n° de voie du module As-i</li> </ul>	n° d'esclave sur le bus As-i concerné n : de 0 à 31	n° de variable sur l'esclave concerné i : de 0 à 3

#### IV.1.6 Instructions de PL7

Les langages PL7 exploitent tous le même jeu d'instructions. Par souci de simplicité celles-ci ont été classées en 2 jeux : les instructions de base et les instructions avancées.

##### IV.1.6.1 Instructions de base

Elles comprennent les instructions booléennes de base, les blocs fonctions prédéfinis, et les instructions arithmétiques et logiques sur entier.

##### IV.1.6.2 Instructions avancées

Elles comprennent des instructions répondant à des besoins de programmation avancée. Ces instructions sont de 2 types :

- Type de langage PL7: elles augmentent les possibilités de traitements du langage par des fonctions spécifiques (manipulation de chaînes de caractères, gestion du temps...),
- Type métiers : elles offrent des fonctions spécifiques au métier à traiter, exemple de fonctions pour le métier communication :
  - PRINT pour envoyer un message type chaîne de caractères à un terminal ou une imprimante,
  - SEND pour envoyer un message à une application,
  - PID fonction PID de régulation.

#### IV.1.7 Editeurs de PL7

Le logiciel PL7 propose plusieurs types d'éditeurs qu'on pourra utilisés selon la nécessité de chaque étape de programmation. La figure 6 montre la fenêtre qui permet d'accéder aux différents éditeurs :

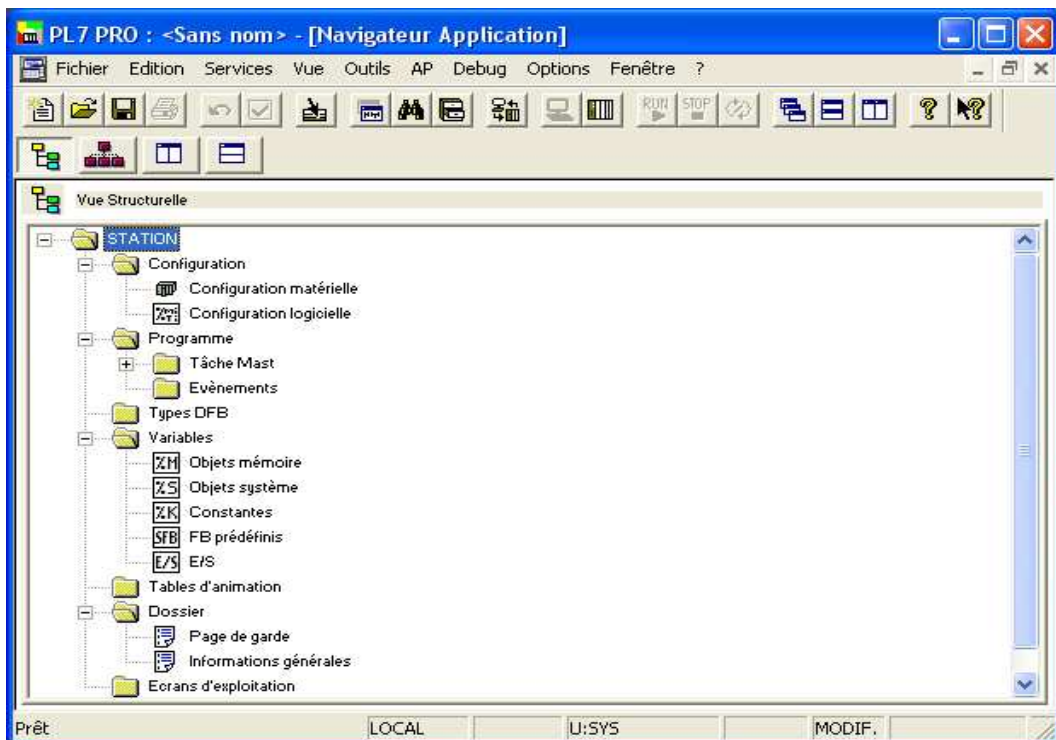


Figure IV.5 Accès aux éditeurs de PL7.

##### IV.1.7.1 L'éditeur de configuration

L'éditeur de configuration PL7 présenté dans la figure IV.5 assure pour chaque application les fonctions suivantes :

- la configuration matérielle,
- la configuration logicielle,
- la configuration des objets Grafcet dans le cas de programmation en langage Grafcet.

#### **IV.1.7.2 Editeurs de programme**

Les éditeurs de programme permettent la programmation des fonctions et métiers mise en œuvre par l'application. Quatre éditeurs programme sont proposés :

- L éditeur langage à contacts (LD),
- L éditeur langage liste d'instructions (IL),
- L éditeur langage littéral structuré (ST),
- L éditeur langage Grafcet (G7).

#### **IV.1.7.3 L'éditeur des types DFB**

L'éditeur de DFB permet de programmer des blocs fonction propres à l'utilisateur qui répondent aux spécificités de ses applications. Ces blocs fonction utilisateur permettent de structurer une application. Ils seront utilisés dès qu'une séquence de programme se trouve répétée dans une application ou pour figer une programmation standard.

#### **IV.1.7.4 L'éditeur de variables**

L'éditeur de variables est un outil qui permet de :

- Symboliser les différents objets de l'application,
- Paramétrer les blocs fonction prédéfinis,
- Saisir les valeurs de constantes et choisir la base d'affichage,
- Paramétrer les blocs fonction utilisateur DFB (bloc fonction prédéfinis).

L'accès aux variables est facilité par :

- Classement par famille et par type,
- Des fonctions de tri (symboles ou repères),
- La possibilité de pré symboliser des objets des certains métiers,
- La possibilité de lancer une recherche avec un joker sur symboles ou commentaires,
- La possibilité de filtre sur les E/S,
- La possibilité de copier/coller par bloc de variables,
- La possibilité de supprimer la près-symbolisation.

#### **IV.1.7.5 Editeur de tables d'animation**

L'éditeur de tables d'animation permet de créer des tables contenant des listes de variables à surveiller ou à modifier. Cet éditeur propose des fonctionnalités telles que :

- Création manuelle de tables par saisie des variables, ou création, automatique à partir de tout ou parties de sections de programme ou d'objets animés dans un écran d'exploitation,
- Modification de la valeur courante des variables,
- Forçage de la valeur courante des objets bits,
- Choix de la base d'affichage de la valeur courante (décimal, binaire, hexadécimal,...).

#### **IV.1.7.6 Editeur de documentation**

L'éditeur de documentation permet de constituer, de visualiser et d'imprimer le dossier de l'application. Il s'articule autour du navigateur de documentation qui montre sous forme arborescente la constitution du dossier. Cet éditeur permet de définir :

- Une page de garde, comprenant le nom du concepteur et du projet,
- Des pages d'informations générales,
- Un cartouche.

Il génère automatiquement :

- Le sommaire,
- Le dossier d'application : configurations matérielle / logicielle, et programme,
- La liste des variables, triées par repère ou par symbole,
- Les références croisées, triées par repère ou symbole.

#### **IV.1.7.7 L'éditeur d'écrans d'exploitation**

L'éditeur d'écrans d'exploitation est un outil destiné à faciliter l'exploitation d'un processus automatisé. Il permet à un concepteur de développer des écrans adaptés au procédé et qui offre à l'exploitant :

- Un ensemble d'informations affichées en clair : texte explicatif, valeurs dynamiques, synoptiques couleurs, ...
- La possibilité d'agir simplement et rapidement : modification et surveillance dynamique des variables automate, ...

L'éditeur d'écrans d'exploitation comporte trois fenêtres de taille paramétrable:

- Le navigateur qui permet d'accéder aux différents écrans d'exploitation,

- L'éditeur graphique qui permet de créer, modifier puis d'exploiter l'animation des écrans,
- La fenêtre de visualisation utilisée pour faciliter la mise au point d'une application et visualiser de façon très simple les messages de diagnostic.

#### **IV.1.8 Chargement de programme dans l'automate**

Un programme PL7 est spécifique à un type d'automate. Un programme PL7 est un fichier d'extension **\*.stx** ; ce fichier contient certaines informations de configuration permettent à celui-ci de configurer l'automate. La configuration est spécifique à chaque programme.

##### **IV.1.8.1 Procédure de chargement**

Le programme ne sera transféré qu'une seule fois dans l'automate. Il restera dans l'automate même si l'alimentation est coupée. Une connexion à l'automate est suffisante pour le piloter à l'aide du logiciel PL7.

Le chargement se fait comme suit :

- Choisir « fichier> ouvrir » dans le menu principale,
- Choisir le programme à télécharger sur l'automate,
- Choisir « fichier> AP> définir l'adresse de l'automate » dans le menu principal afin de définir l'adresse XIP de l'automate sur lequel on désire installer le programme. On doit alors définir l'adresse XIP (XWAY) de l'automate dans le champ « adresse », on doit également choisir un driver,
- Enregistrer, cela permet de sauvegarder les modifications dans le fichier. De plus, on aura donc à redéfinir l'adresse XWAY lors de la prochaine ouverture du programme,
- On peut maintenant transférer le programme dans l'automate. L'automate doit être en mode STOP, dans le cas contraire, PL7 nous demande d'effectuer cette action. A partir de cette étape, le programme restera stocké

dans l'automate même si l'on coupe l'alimentation. Les étapes précédentes ne seront plus répétées. On peut ensuite se connecter à l'automate.

## IV.2 Algorithme de calcul de la loi de commande

Dans cette section, nous avons établi l'algorithme de calcul du correcteur à modèle interne discret obtenu, qui sera facilement implanté sur un calculateur ou sur automate pour la simulation ou la régulation en ligne.

- Entrées :
  - $y_d(k)$  : La consigne (pH désiré),
  - $y_r(k)$  : La mesure du capteur pH.
- Sorties :
  - $U$  : commande à appliquer au procédé (quantité du lait de la chaux)
- Calcul de l'écart modèle-procédé  $\epsilon$  :

$$\epsilon(k) = y_r(k) - y_m(k) \quad (1)$$

- Calcul de l'erreur  $e$  :

$$e(k) = y_d(k) - \epsilon(k) \quad (2)$$

- Calcul de la commande  $u$  :

$$u(k) = 0.500 u(k-1) - 56.123 e(k) - 88.595 e(k-1) + 46.960 e(k-2) \quad (3)$$

- Calcul de la sortie de modèle  $y_m(k)$  :

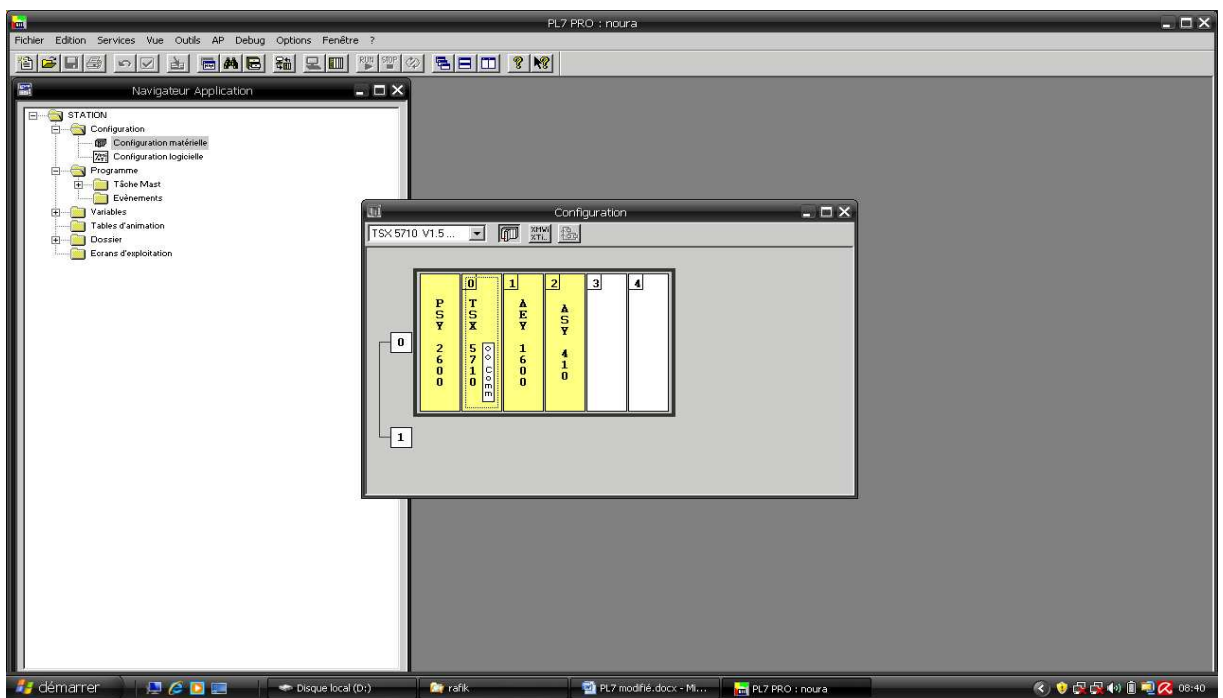
$$y_m(k) = 1.578 y_m(k-1) - 0.837 y_m(k-2) + 0.0046 u(k-1) + 0.004 u(k-2) \quad (4)$$

## IV.3 Programmation de la loi de commande en PL7

### IV.3.1 Configuration matérielle

Notre programme consiste en l'implantation de la loi de commande que nous avons synthétisée sur l'automate programmable Schneider. La configuration matérielle sera imposée par le programme général du procédé de neutralisation et pas par le programme de loi de commande.

Pour illustrer le programme de la loi de commande, nous avons choisi par défaut une alimentation (PSY 2600), une CPU (TSX 5710), un module d'entrées analogiques (TSX AEY 1600 à 16 entrées analogiques), un module de sorties analogiques (ASY 410 à 4 sortie). La figure IV.6 montre la configuration matérielle choisie.



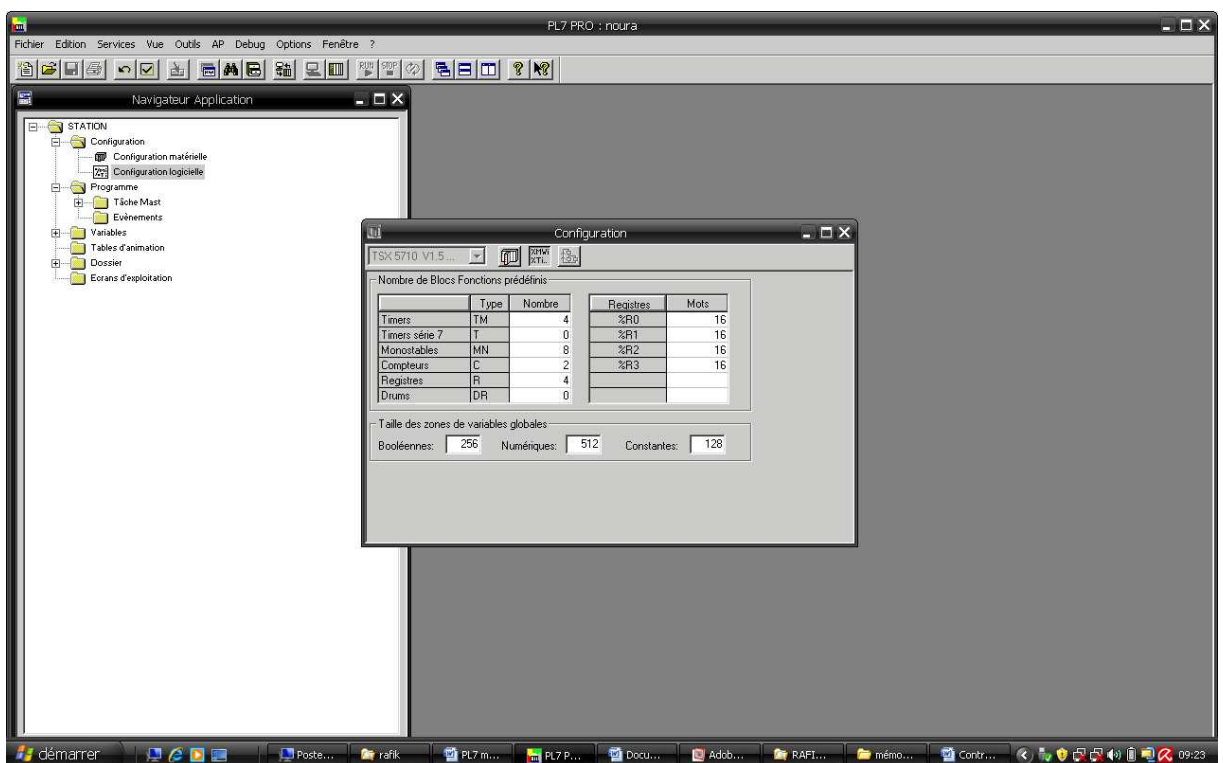
**Figure IV.6 : Configuration matérielle choisie.**

### IV.3.2 Configuration logicielle

La configuration logicielle consiste à choisir le nombre de bloc fonction prédéfinie (compteurs, registres, timers...) à utilisées et la taille des zones de variables

globales (booléennes, numérique et constantes). Le choix doit être fait en minimisant au maximum l'espace mémoire occupé par le programme, par exemple on ne doit pas configurer 10 timers si on utilise uniquement 5 dans notre programme.

Pour notre application la configuration logicielle sera aussi choisie par défaut du moment qu'elle sera définie en fonction du programme générale du procédé de neutralisation. La configuration sera composée de 2 compteurs, 8 monostables, 4 registres et 4 timers. La taille mémoire de la zone des variables booléennes est de 256 Mo, celle des variables numériques est de 512 Mo et celles des constantes est de 128- Mo. La Figure IV.7 montre la configuration logicielle choisie.



**Figure IV.7: configuration logicielle choisie**

### IV.3.3 Déclaration des variables

Cette opération consiste à déclarer et symboliser toute les variables (entrées, sorties, objets mémoire et objets système) qui seront utilisées dans le programme et leurs types (booléennes, mots, double mots, flottante).

#### **IV.3.4 Création de la tache MAST**

La création d'une tache MAST permet de choisir l'un des langages de programmation du PL7 (langage à contacte, liste, littéral structuré ou grafcet) à utiliser pour programmer la loi de commande et ensuite saisir le programme. Le programme est présenté dans l'annexe.

## **Conclusion**

La programmation en PL7 est facilitée par sa structure bien organisée, ses instructions avancées et les blocs des fonctions prédéfinies.

Le programme que nous avons réalisé représente juste une partie du programme générale de la station, elle consiste à réguler l'injection du lait de chaux dans le réservoir d'eau traitée pour la neutralisée. Cependant le programme général de la station doit tenir compte de beaucoup d'autres tâches comme par exemple le démarrage et l'arrêt des pompes, l'ouverture et la fermeture des vannes, les arrêts d'urgence et les conditions de sécurités

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la commande des procédés. Il consiste à concevoir une loi de commande numérique pour le procédé de neutralisation de la station de traitement de TAKSEBT, et de l'implémenter sur un automate programmable en utilisant le langage PL 7. Ainsi, la commande à modèle interne a été adoptée pour contrôler le pH de l'eau traitée.

Après la description générale de la station de traitement de l'eau de TAKSEBT, nous avons étudié et identifié le procédé de neutralisation, ensuite une loi de commande à modèle interne, sous la forme numérique, a été synthétisée. Les performances de cette dernière ont été évaluées par des tests de simulation en utilisant Matlab. Enfin, en vue d'une implémentation sur un automate programmable de type Schneider, nous avons programmé, en langage PL 7, et testé la loi de commande synthétisée par simulation.

Le travail réalisé nous a permis d'aborder un problème de commande depuis l'identification jusqu'à la simulation de la loi de commande en passant par la synthèse de la loi de commande. Une démarche fréquemment suivie par un automaticien.

A la lumière des résultats obtenus, on peut affirmer que la commande à modèle interne offre de bonnes performances. De plus, cette commande est simple à synthétiser et à implémenter puisque sous sa forme numérique, le problème revient à programmer des équations aux différences ce qui est très simple à faire.

La loi de commande développée concerne le bâtiment chaud, comme perspective de continuité, on propose d'étendre l'application de la commande à modèle interne pour les bâtiments acide, chlore et chimie puisque dans tous ces bâtiments l'opération de régulation s'effectue par l'injection des réactifs.

## ***Bibliographie***

### ***Ouvrage :***

- Jean-Marie Flaus « Régulation industrielle ».Edition HERMES,Paris 1994
- Documentation interne de la station.

### ***Mémoires :***

- CHAUCHE Hakima, BRAHIMI Mokrane «Développement d'une solution de commande et de supervision on line de l'unité de dessalement de SONELGAZ (Cap DJINET) à base d'un API SIMATIC S7», département d'Automatique, 2006/2007.
- F.NAHI, L.ZIANE « Configuration d'un système HMI d'une station de traitement d'eau potable de l'ADE » département d'Automatique, 2004/2005.

### ***Sites Web :***

- <http://www.schneider-elec.com>
- <http://www.fao.org>