

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERRI, Tizi-Ouzou



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

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

De Master en Automatique, option : Commande des systèmes

Thème

***Contribution à la modélisation et à la
commande d'un procédé de filtration***

Encadré par :

M^r DJENNOUNE

Soutenu le : / / 2011

Présenté par :

OMOURI Amine

AMOURA Aziz

Promotion 2011

Remerciements

Grâce à Dieu vers lequel vont toutes les louanges, ce travail s'est accompli. Grâce à Dieu, nous avons l'honneur d'inscrire ici un immense remerciement à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur DJENNOUNE, qui, en tant que Directeur de ce projet, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce dernier, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer, et sans son assistance ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Enfin, nos remerciements s'adressent aux personnels de la station BOUDOUAOU, pour leurs disponibilités et leur aide quant à la compréhension des procédés mis en jeu sur l'usine de traitement d'eau potable dirigée par SEAAL et aux moyens matériels qu'ils ont mis à notre disposition. Cette thèse ne serait certainement pas allée aussi loin sans leur aide précieuse.

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DU PROCEDE E FILTRATION	3
1. Principe généraux de la filtration.....	3
1.1. Filtration	3
1.2. Place de la filtration dans le traitement de l'eau	4
1.2.1. Coagulation.....	4
1.2.2. Floculation	5
1.2.3. But de la coagulation floculation	5
1.2.4. La séparation solide –liquide	6
1.2.5. Désinfection.....	7
1.2.6. Traitement final : Mise à l'équilibre calco-carbonique	10
2. Description interne du procédé de filtration	12
2.1. Les spécifications requises	12
2.2. La turbidité de l'effluent.....	12
2.3. La perte de charge.....	13
2.4. La capacité de rétention	14
2.5. L'encombrement.....	14
3. Les filtres à sable rapides.....	14
3.1. Introduction	14
3.2. Description granulométrique du sable dans les filtres rapide	15
3.2.1. Tamisage.....	16
3.2.2. Caractéristique de la distribution granulométrique d'un sable de filtration.....	16
3.2.3. Aspect dimensionnel du substrat filtrant	17
3.3. Fonctionnement d'un filtre a sable rapide	19
3.3.1. Variation de la turbidité et de la perte de charge	19
3.3.2. Optimisation de l'utilisation de filtre	22
3.3.3. Lavage des filtres.....	23
3.4. Filtre AQUAZUR type V	25
3.4.1. Description et caractéristiques du filtre AQUAZUR type V	26
3.4.2. Avantages du filtre AQUAZUR type V	29
4. Conclusion.....	31

CHAPITRE 2 : Modélisation du procédé de filtration

1. Equations physiques	33
1.1 Lois de Darcy.....	33
1.2 Pertes de charge	35
2. Construction du modèle	42
2.1. Approche de la modélisation	42
2.2. Notion d'état	42
2.3. Formulation des équations d'état du système.....	43
2.3.1. Equation d'état de la hauteur en amont	43
2.3.2. Equation d'état de la hauteur en aval	44
2.4. Détermination de la perméabilité.....	45
2.5. Détermination du coefficient d'écoulement K_v	47
2.5.1 Interpolation du coefficient d'écoulement en fonction de l'angle d'ouverture ..	49
2.5.2 Interpolation polynomiale linéaire	49
3. Simulation et analyse du modèle non-linéaire	50
3.1. Introduction	50
3.2. Modèle sous Simulink	51
3.2.1 Présentation du modèle	51
3.2.2. Interprétation et validation du modèle	53
4. Conclusion	54

CHAPITRE 3 : Synthèse d'une loi de commande basée sur modèle établi.

1. Objectif de la commande	56
2. Système de commande existant	56
2.1. Généralités	56
2.2. Description matérielle du processus	58
2.3. Rack électronique de régulation	59
2.4. Limites et inconvénients.....	62
3. Application d'une commande à base du modèle établi	63
3.1. Linéarisation du modèle obtenu	63
3.2. Forme normale	66
3.3. Rejet de perturbation	70
3.3.1. Application d'une commande pour le rejet de perturbation.....	70
3.3.2. Obtention de l'angle d'ouverture de la vanne	73
3.3.3. Etude énergétique du système avec la nouvelle commande	75

3.3.4.	Robustesse de la commande vis-à-vis des variations de la perturbation.....	76
3.3.5.	Excitation de l'actionneur et conversion du signal	78
3.3.6.	Retard de phase engendré par la vanne	80
4.	Perspectives	81
4.1.	Implémentation logicielle	81
4.2.	Implémentation matérielle.....	85
5.	Conclusion.....	86
	CONCLUSION GENERALE.....	87

Liste des figures

Chapitre 1 : Description du procédé de filtration.

Figure 1.1 : Schéma de l'opération de la coagulation-floculation	6
Figure 1.2 : Chaîne de traitement	11
Figure 1.3 : Variation de la turbidité en fonction du temps	20
Figure 1.4 : Variation des pertes de charges en fonction du temps	21
Figure 1.5 : Variation de la perte de charge et de la turbidité en fonction du temps	23
Figure 1.6 : Schéma du filtre Aquazur type V	30

Chapitre 2 : Modélisation du procédé de filtration.

Figure 2.1 : Image de la conduite reliant le filtre au déversoir	38
Figure 2.2 : Schéma de la simplification de la réduction et de l'élargissement au niveau de la conduite	39
Figure 2.3 : Illustration de l'approche de la modélisation	42
Figure 2.4 : Courbe de la perméabilité identifiée en fonction du temps	46
Figure 2.5 : Courbes de l'évolution de K_v et de l'angle d'ouverture α en fonction du temps	48
Figure 2.6 : Courbe de l'évolution du coefficient K_v comparée à celle de K_v réel	50
Figure 2.7 : Synoptique du modèle sous Simulink	52
Figure 2.8 : Courbe de l'évolution des variables d'états du modèle comparées à celle du système réel	53

Chapitre 3 : Synthèse d'une loi de commande à base du modèle établi.

Figure 3.1 : Schéma globale du filtre muni de son actionneur	57
Figure 3.2 : Schéma de la boucle de régulation (régulateur analogique)	59
Figure 3.3 : Schéma de représentation du cas standard de l'actionneur	61

Figure 3.4 : Schéma équivalent de la boucle de régulation (régulateur analogique)	61
Figure 3.5 : Schéma illustrant la linéarisation du modèle	64
Figure 3.6 : Schéma de la linéarisation sous Simulink	65
Figure 3.7 : Synoptique de la forme normale du modèle sous Simulink	68
Figure 3.8 : Courbe de l'évolution des variables d'états dans la nouvelle base comparés à ceux de L'ancienne base	69
Figure 3.9 : Schéma de l'application du rejet de perturbation sous Simulink	71
Figure 3.10 : Courbe de la variation des hauteurs après rejet perturbation	72
Figure 3.11: Courbe de l'évolution des variables d'états après rejet de perturbation comparés à ceux de la régulation existante	72
Figure 3.12 : Courbe de l'évolution de K_v après rejet de perturbation comparé à celui de la régulation existante en fonction du temps.....	74
Figure 3.13 : Courbe de l'évolution de l'angle α après rejet de perturbation comparé à celui de la régulation existante	74
Figure 3.14 : Courbes de la vitesse angulaire après rejet de perturbation comparées à celle de la régulation existante	75
Figure 3.15 : Courbe de la nouvelle perturbation	76
Figure 3.16 : Courbe de l'évolution des hauteurs après injection de la nouvelle perturbation	77
Figure 3.17 : Courbe de l'évolution de l'angle α après injection de la nouvelle perturbation	77
Figure 3.18 : Représentation de l'implémentation logicielle	85
Figure 3.18 : Automate programmable (SOFREL S550).....	85

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Exemple de valeurs du facteur géométrique en fonction de la géométrie du sable	18
Tableau 2.1 : Tableau indicatif de la variation de K_v en fonction de l'angle d'ouverture de la vanne papillon	41
Tableau 3.1 : Illustration de la fonction codage	60
Tableau 3.2 : Illustration de la méthode de détermination de la nature de l'action (en boucle ouverte)	78
Tableau 3.3 : Illustration de la méthode de détermination de l'angle α en (boucle fermée)	79

Liste des abréviations

MES : Matières en suspension.

P : Pression.

P_e : Pression statique à l'amont du filtre.

P_s : Pression statique à l'aval du filtre.

f : Facteur géométrique.

LPV : Systèmes Linéaires à Paramètres Variant.

μ : Viscosité.

ΔP : Perte de charge.

V : Volume du filtrat obtenu.

U : Vitesse d'écoulements de fluide.

ρ : Masse volumique du fluide.

E_s : Epaisseur du sable.

E_g : Epaisseur du gâteau.

L : La longueur du support filtrant.

h : Hauteur.

h₁ : Hauteur de l'eau en amont du filtre.

h₂ : Hauteur de l'eau en aval du filtre.

K : La perméabilité.

k : Coefficient de perte de charge singulière.

K_v : Coefficient d'écoulement.

ΔH_r : Perte de charge régulière.

S_1, S_2 : Sections terminales de la conduite cylindrique.

λ : Coefficient de la perte de charge régulière(ou encore appelé coefficient de Fanning).

S : Section de support filtrant.

D : Diamètre de la conduite.

v : Vitesse débitante.

g : Accélération due à la pesanteur.

Re_D : Nombre de Reynolds.

ΔH_s : La perte de charge singulière.

N_r : Nombre de tronçons d'une conduite.

N_s : Nombre de singularités en série dans une conduite.

ΔH_{totale} : Perte de charge résultante.

$\Delta H_{singulières}$: Totalité des pertes de charge singulières.

$\Delta H_{régulières}$: Totalité des pertes de charge régulières.

ΔH_{vanne} : Perte de charge singulière au niveau de la vanne.

Q_e : Débit entrant au filtre.

Q_f : Débit de filtration.

Q_s : Débit sortant du filtre.

x_1 : Variable d'état qui représente le niveau d'eau h_1 .

x_2 : Variable d'état qui représente le niveau d'eau h_2 .

A : Matrice d'état.

B : Matrice de commande.

C : Matrice de sortie.

D : Matrice de transmission directe.

$h_{1\text{mesuré}}$: Niveau d'eau mesurée en amont du lit filtrant.

$h_{2\text{mesuré}}$: Niveau d'eau mesurée en aval du lit filtrant.

α : Angle d'ouverture de la vanne régulatrice.

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

K_p : Gain proportionnel.

u : Coefficient d'écoulement, considéré comme signal de commande du système.

U : Commande linéarisant.

W : Echelon de perturbation.

z_1 : Variable d'état après changement de base.

z_1 : Variable d'état après changement de base.

τ : Constante de temps en seconde.

t_r : Temps de réponse.

s : Variable de Laplace.

Introduction générale

L'établissement de modèles représentant les systèmes est un problème incontournable en automatique, aussi bien en ce qui concerne la conduite que le diagnostic. Les systèmes industriels étant de plus en plus complexes, le contrôle automatique des procédés s'avère d'une nécessité accrue afin de maintenir une bonne qualité de service. Ces deux considérations ont motivé d'importants efforts dans le développement de méthodes de contrôle et de surveillance automatique durant ces dernières années. Le présent travail s'inscrit dans ce courant, en proposant une nouvelle approche pour l'automatisation du procédé de filtration en traitement d'eau potable.

Description du problème

Une usine de production d'eau potable se doit de satisfaire la demande en eau tout en assurant un niveau de qualité d'eau élevé et uniforme.

Le procédé de filtration est l'une des étapes les plus importantes dans le traitement des eaux de surface (90 % des usines sont concernées). Le contrôle et la surveillance automatique de ce procédé sont essentiels pour atteindre trois objectifs : la maîtrise de la qualité de l'eau traitée en sortie (réglementation de plus en plus stricte relative à la présence des matières en suspension dans l'eau traitée), prolonger la durée de filtration pour augmenter le volume d'eau filtrée et enfin la diminution des contraintes et des coûts de fonctionnement.

En traitement de l'eau, comme dans beaucoup d'autres domaines, le contrôle efficace des procédés est fortement assujéti à la connaissance des variables internes et des lois régissant le procédé physique, ce qui nous ramène à la construction d'un modèle déterministe. Etant donnée la grande variabilité de l'entrée du système (eau brute) et la complexité élevée que présente la filtration, les problématiques d'élaboration et de validation de ce modèle ainsi que sa commande seront au centre de ce mémoire.

Par ailleurs, nous décrivons le problème de la construction d'un modèle pour la détermination en ligne de l'angle d'ouverture optimale de la vanne régulatrice de sortie, considérée comme étant l'organe de commande du procédé de filtration, et cela en fonction de différents paramètres du procédé telles que la turbidité, le colmatage, la perte de charge, ... etc.

Contribution du mémoire

L'innovation de ce travail réside principalement dans l'intégration des principes physiques régissant le système dans le procédé de régulation permettant ainsi : la détermination et la validation des paramètres ajustable (par simulation), la prévision de l'angle d'ouverture de la vanne régulatrice, et l'analyse des incertitudes. Etant donné la forte variabilité de l'entrée et la fiabilité des capteurs disponibles, un objectif important pour un tel système est en effet la robustesse par rapport à des caractéristiques inattendues de l'eau brute, dues à des pollutions accidentelles par exemple, dans notre système.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en trois parties distinctes. La première partie est consacrée à une introduction générale et à une description du procédé (chapitres 1). La deuxième partie décrit la méthodologie et les étapes utilisée pour la construction du modèle déterministe (chapitres 2). La dernière partie présente la mise en place d'un système de commande approprié aux exigences et aux performances désirées tout en prenant en compte les spécifications et les propriétés du filtre (chapitres 3).

Chapitre 1

Description du procédé de filtration

Introduction

La filtration à sable est un des procédés les plus répandus en traitement de l'eau potable. Pendant près d'un siècle, on l'a considéré comme la réplique parfaite de la filtration naturelle mais dotée des standards de la performance technologique. D'autres matériaux que le sable sont utilisés aussi pour la filtration, tel que le charbon actif granulaire et l'antracite traité. Les propriétés physiques spécifiques du matériau doivent être prises en considération : taille du grain, sa densité et sa porosité volumique.

Dans ce chapitre nous avons utilisé les références bibliographiques suivantes : [01], [02], [03], [09], [11], [12].

1. Principes généraux de la filtration

1.1. Filtration

La filtration est une technique de séparation et de fractionnement de substances ; plus particulièrement, elle sépare la phase liquide de la phase solide. Elle est un des procédés important du traitement de l'eau. Deux méthodes se distinguent en fonction du résultat souhaité : soit c'est le liquide, ou filtrat, qui est récupéré, soit c'est la phase solide qui est recueillie. Ce deuxième objectif peut correspondre à un processus secondaire d'envergure, tel que la récolte des boues. Ce présent mémoire ne décrit que la purification de la phase liquide.

En effet dans la plupart des applications, les techniques de filtration ont recours à des installations, ou des filtres, qui sont des superstructures. Celles-ci sont soit des filtres lents, soit des filtres rapides. Le fonctionnement des premiers est semblable à la recharge de la nappe phréatique. Les filtres rapides se manifestent selon deux principes : les filtres à

flux gravitationnel et les filtres à pressions. Les filtres à sable lents sont caractérisés par une charge hydraulique superficielle, ou une vitesse moyenne de flux, de 0.10 à 0.30 m/h.

Les filtres rapides quant à eux se distinguent par une vitesse moyenne de 2.5 m/h à 20.0 m/h (soit 0.7 à 2.8 mm/s). Les filtres ultrarapides sous pression atteignent parfois des charges superficielles de 15 à 20.0 m/h. Toutes les vitesses de flux mentionnées ci-dessus sont des moyennes estimées par rapport à la surface totale, i.e. la section des bassins considérés. Elles sont donc différentes des vitesses réelles qui ont cours dans les interstices du substrat de filtration, c.-à-d. qu'elles sont différentes de la vitesse d'infiltration.

1.2. Place de la filtration dans le traitement de l'eau

Le procédé de filtration sur sable, et particulièrement la filtration rapide, comprend généralement une filière de clarification qui a recourt à d'autres processus unitaires. Ceux-ci précèdent la filtration dans la séquence des traitements ; ils ne peuvent pas être envisagés comme complètement indépendantes de l'étape de la filtration. Le schéma le plus classique des traitements qui précèdent la filtration est la séquence coagulation-floculation-décantation

1.2.1. Coagulation

Les particules colloïdales en solution sont « naturellement » chargées négativement. Ainsi, elles tendent à se repousser mutuellement et restent donc en suspension. On dit qu'il y a stabilisation des particules dans la solution.

La coagulation consiste en la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. On utilise, pour ce faire, des réactifs chimiques nommés coagulants. Le procédé nécessite une agitation importante.

Les coagulants sont des produits capables de neutraliser les charges des colloïdes présents dans l'eau. Le choix du coagulant pour le traitement de l'eau de consommation doit tenir compte de l'innocuité du produit, de son efficacité et bien sûr de son coût. Le type de coagulant et la dose ont une influence sur :

- la bonne ou la mauvaise qualité de l'eau clarifiée.
- le bon ou le mauvais fonctionnement de la floculation et de la filtration.
- le coût d'exploitation.

Il existe deux principaux types de coagulants : les sels de fer (chlorure ferrique) et les sels d'aluminium (sulfate d'aluminium). Le choix du coagulant peut varier avec la

température et donc avec la saison. Le sulfate d'aluminium, par exemple, est un coagulant utilisé pour une température d'eau supérieure à 12 °C. Rappelons également que plus un coagulant possède de charges positives, plus son efficacité est grande.

1.2.2. La floculation

La floculation est le phénomène de formation de flocons de taille plus importante (agglomération des colloïdes déchargés dans un réseau tridimensionnel). On utilise, pour se faire, des floculants ou adjuvants de floculation. Contrairement à l'étape de coagulation, la floculation nécessite une agitation lente.

Les floculants ou adjuvants de floculation sont, dans leur grande majorité, des polymères de poids moléculaire très élevé. Ils peuvent être de nature minérale, organique naturelle ou organique de synthèse.

Comme pour la coagulation, il existe un certain nombre de paramètres à prendre en compte pour le bon fonctionnement de ce procédé. Le mélange doit être suffisamment lent afin d'assurer le contact entre les flocons engendrés par la coagulation. En effet, si le mélange dépasse une certaine puissance, les flocons risquent de se briser. Il faut également un temps de séjour minimal pour que la floculation ait lieu. La durée du mélange se situe entre 10 et 60 minutes. Les temps d'injection du coagulant et du floculant sont en général espacés de 1 à 3 minutes, cette durée étant fonction de la température de l'eau.

1.2.3. But de la coagulation-floculation

L'opération de coagulation-floculation a donc pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales par déstabilisation des particules en suspension puis formation de flocons par absorption et agrégation). Les flocons ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite (cf. Figure (1.1)).

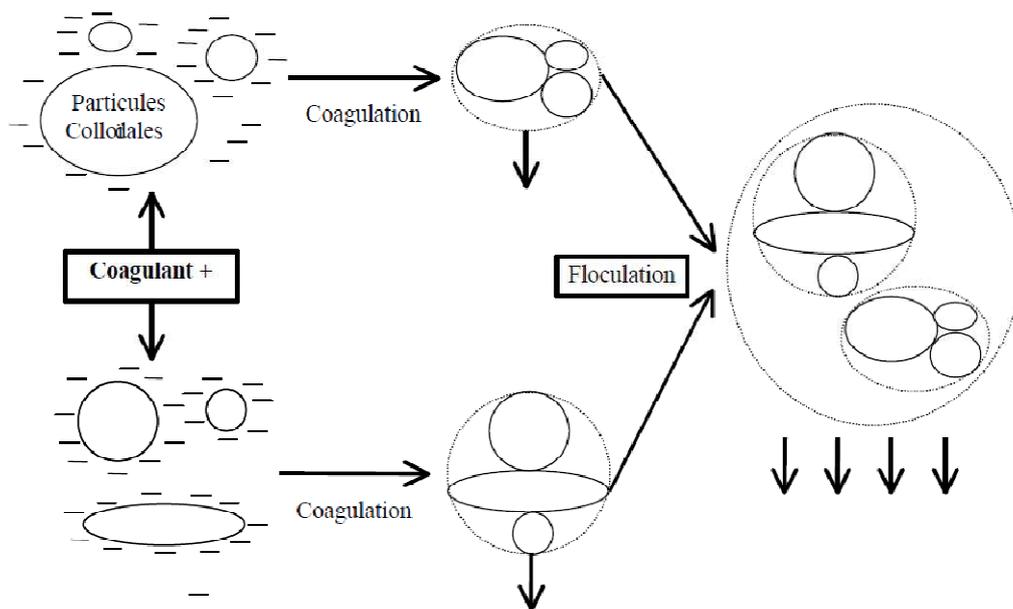


Figure 1.1 : Schéma de l'opération de la coagulation-floculation.

1.2.4. La séparation solide-liquide

Une fois le floc formé, il faut le séparer de l'eau. C'est ce qu'on appelle la séparation solide-liquide. Elle peut s'effectuer par différents moyens :

- La coagulation sur filtre.
- La décantation.
- La flottation.

Nous ne parlerons ici que de la décantation, qui est le procédé le plus couramment utilisé actuellement. Les deux autres techniques sont, quant à elles, plus adaptées aux eaux brutes peu chargées en MES, possédant peu de coloration.

Il existe deux types de décanteurs : les décanteurs statiques et les décanteurs à contact de boues. L'usage a consacré le terme « statique » pour désigner les décanteurs qui ne sont ni à circulation de boues, ni à lit de boues, bien que, dans ces appareils, la décantation s'effectue en fait selon un processus dynamique.

Afin d'augmenter la probabilité qu'ont les particules de se décanter dans les décanteurs à contact de boues, on met l'eau additionnée de réactifs (eau brute + coagulant) en contact avec des boues concentrées provenant de la décantation. Deux procédés peuvent être employés pour assurer le contact avec les boues :

- **Les appareils à recirculation de boues** : les boues sont séparées de l'eau clarifiée dans une zone de décantation. Elles sont ensuite re-circulées dans une zone de mélange munie d'une agitation mécanique ou hydraulique. L'eau brute, additionnée de réactifs, est également introduite dans cette zone de mélange.
- **les appareils à lit de boues proprement dit** : on ne cherche pas à faire circuler la boue. Il s'agit également de la maintenir sous forme d'une masse en expansion que l'eau peut traverser de bas en haut, d'une façon aussi régulière et uniforme que possible. Le brassage, très doux, est réalisé au niveau de l'introduction de l'eau à traiter.

1.2.5. La désinfection

But de la désinfection :

Le but de la désinfection est d'éliminer tous micro-organismes pathogènes présents dans l'eau afin d'empêcher le développement de maladies hydriques. Au niveau de l'exploitant, les dangers liés à la présence de micro-organismes pathogènes dans les eaux distribuées sont multiples :

- risque à très court terme amplifié par le délai d'analyse qui est au minimum de 24 heures ;
- risque omniprésent, les problèmes pouvant intervenir sur tous types de ressource et dans n'importe quel réseau de distribution ;
- gravité des maladies, qui peuvent être mortelles ;
- ampleur de la contamination qui peut aller jusqu'à plusieurs milliers de personnes.

Définition :

Après la filtration survient la désinfection qui consiste à mettre en contact un désinfectant à une certaine concentration pendant un certain temps avec une eau supposée contaminée. Cette définition fait apparaître trois notions importantes : les désinfectants, le temps de contact et la concentration en désinfectant.

a) Les désinfectants

Les trois principaux désinfectants utilisés en eau potable sont les suivants :

- **Le chlore** : c'est le plus connu et le plus universel. En solution, le chlore réagit avec l'eau pour former deux composés, l'acide hypochloreux (HClO) et des ions hypochlorites (ClO^-). L'acide hypochloreux a un effet bactéricide plus important que l'ion hypochlorite. Le pourcentage respectif de ces deux espèces dans l'eau dépend du pH de l'eau. Plus le pH de l'eau est élevé, moins il y a d'acide hypochloreux pour une dose donnée de chlore.
- **L'ozone** : l'ozone est un gaz extrêmement instable et un oxydant très puissant. Il n'a pas de pouvoir rémanent et donc ne dispense pas d'un ajout de chlore sur le réseau pour une action bactériostatique. L'ozone est fabriqué sur place à partir d'oxygène au travers d'un champ électrique créé par une différence de potentiel entre deux électrodes de 10 à 20 kV. L'oxygène provient soit d'air sec, soit d'oxygène pur du commerce. L'ozone est certainement l'oxydant le plus efficace sur les virus, le fer et le manganèse. Il ne donne pas de goût à l'eau, contrairement au chlore, et oxyde fortement les matières organiques. Pour obtenir un effet désinfectant, le temps de contact doit être suffisamment long, d'où la nécessité d'ouvrages adaptés (tours de contact par exemple).
- **le rayonnement UV** : l'irradiation par une dose suffisante de rayonnement UV permet la destruction des bactéries, virus, germes, levures, champignons, algues, etc. Les rayonnements UV ont la propriété d'agir directement sur les chaînes d'ADN des cellules et d'interrompre le processus de vie et de reproduction des micro-organismes. Comme pour l'ozone, elle n'est pas caractérisée par un effet rémanent.

Chacun de ces produits possède un pouvoir désinfectant différent que l'on peut classer dans cet ordre :

UV > Ozone > Chlore

b) **Le temps de contact**

En règle générale, le temps de contact varie entre quelques minutes et plusieurs heures. Il peut être très inférieur au temps de séjour théorique, calculé en fonction du débit de l'eau dans le réacteur. En effet, l'eau ne se déplace pas de façon uniforme dans le réacteur. Le plus souvent, il existe des passages préférentiels et des zones mortes. Par exemple, pour une bêche de chloration ayant un temps de séjour théorique d'une heure, certaines molécules d'eau sortiront au bout d'un quart d'heure et d'autres y resteront deux

de heures.

Le cloisonnement des réacteurs permet d'améliorer l'écoulement du fluide et donc de diminuer les effets indésirables dus aux zones mortes et aux passages préférentiels et ainsi d'homogénéiser le temps de séjour dans le réacteur. Le temps de contact dépend de la taille et l'hydraulique du réacteur de contact.

c) La concentration des oxydants

Pratiquement, il s'agit du seul paramètre sur lequel l'opérateur peut intervenir. Il faut retenir que l'efficacité de la désinfection dépend, en partie, du suivi de la concentration en oxydant. L'évolution de la concentration en oxydant est liée à la demande en oxydant de l'eau. Cette demande dépend :

- de la qualité de l'eau,
- du pH,
- des températures (différentes entre été et hiver),
- des matières organiques,
- de la concentration en ammoniacale.

Si l'on prend l'exemple du chlore (le plus courant), une fois la demande instantanée en chlore assurée, le chlore résiduel disparaît progressivement dans le réseau. La dose de chlore libre mesurée diminue au cours du temps. En fonction de la demande en chlore de l'eau.

On observe au bout de quelques heures une quasi-stabilité de la concentration résiduelle. Cet aspect caractéristique du chlore et de ses dérivés est qualifié d'effet rémanent. L'aspect de la courbe de demande en chlore est caractérisé par une forte consommation de chlore lors des premières minutes ou des premières heures. C'est la raison pour laquelle il faudra s'efforcer de désinfecter avec une bâche de stockage afin d'obtenir en sortie d'usine un résiduel de chlore le plus stable possible. Le paramètre de demande en chlore étant difficile à contrôler, on choisit en général de maintenir un niveau de résiduel (consigne) dans l'eau.

Il est indispensable de mesurer régulièrement le résiduel de désinfectant afin de le maintenir au niveau souhaité et d'éviter des problèmes sur le réseau de distribution par la suite.

Paramètres de contrôle :

Pour chaque type de traitement de désinfection, il est nécessaire de contrôler divers paramètres. Les paramètres contrôlés doivent permettre d'évaluer l'efficacité de la désinfection :

- La température : lorsqu'elle augmente, la prolifération micro-biologique s'accélère. Par ailleurs, la consommation en désinfectant est plus importante. Il est donc nécessaire d'être vigilant sur l'évolution de ce paramètre et d'ajuster les consignes de désinfectant en conséquence.
- le pH : l'efficacité du chlore présent dans l'eau varie avec le pH. Il est donc indispensable de mesurer le pH en même temps que le chlore libre afin d'évaluer au mieux l'efficacité du traitement.
- la turbidité : elle caractérise la présence des particules dans l'eau. La présence de turbidité est le signe d'un traitement incomplet. Les particules non retenues lors du traitement peuvent « véhiculer » des micro-organismes qui seront plus difficiles à inactiver par les désinfectants. Enfin, la turbidité révèle la présence de matières en suspension qui pourront former des dépôts dans le réseau, lesquels favorisent, à l'abri de l'action des désinfectants, la prolifération microbienne.
- NH_4^+ et NO_2^- : ils sont consommés par le chlore et peuvent être considérés comme des indicateurs de contamination.

Ces contrôles sont le plus souvent effectués en entrée ou en sortie des contacteurs de désinfection, mais aussi en différents points de réseau.

1.2.6. Traitement final : mise à l'équilibre calco-carbonique

Il y a typiquement deux problèmes distincts : corriger une eau agressive et corriger une eau incrustante. La correction d'une eau agressive peut s'effectuer de plusieurs façons. Premièrement, on peut éliminer le CO_2 par aération. Du fait de l'élimination du CO_2 , le pH augmente et se rapproche du pH d'équilibre. Deuxièmement, on peut ajouter une base à l'eau. L'ajout de base permet d'augmenter le pH et d'atteindre le pH d'équilibre. La correction d'une eau incrustante peut se faire soit par traitement direct soit en réduisant le potentiel d'entartrage par décarbonatation. Le traitement direct correspond à un ajout d'acide.

Importance de l'équilibre calco-carbonique :

Il est très important d'avoir une eau à l'équilibre calco-carbonique lors de la distribution. Une eau qui n'est pas à l'équilibre calco-carbonique attaque les matériaux (canalisations) dans le cas d'une eau agressive, ou provoque la formation des dépôts de calcaire dans le cas d'une eau entartrant. Il en résulte la dégradation des ouvrages et de la qualité de l'eau. Une eau agressive attaque les canalisations du réseau et relargue des métaux toxiques dans le réseau (50 % des branchements présents sur le réseau sont en plomb). Les conséquences sont une dégradation de la qualité de l'eau en cours de distribution et donc des plaintes de la part des usagers. En revanche, une eau incrustante colmate les canalisations. Ceci se traduit par une augmentation de la turbidité et donc des risques de prolifération bactérienne. Les conséquences sont des coûts de nettoyage élevés et des problèmes mécaniques sur les vannes. La dégradation des réseaux se traduit par des dépenses de renouvellement élevées et des perturbations d'exploitation importantes. Dans tous les cas, il est indispensable de maîtriser les caractéristiques de l'eau et donc de lui faire subir un traitement approprié pour atteindre l'équilibre calco-carbonique.

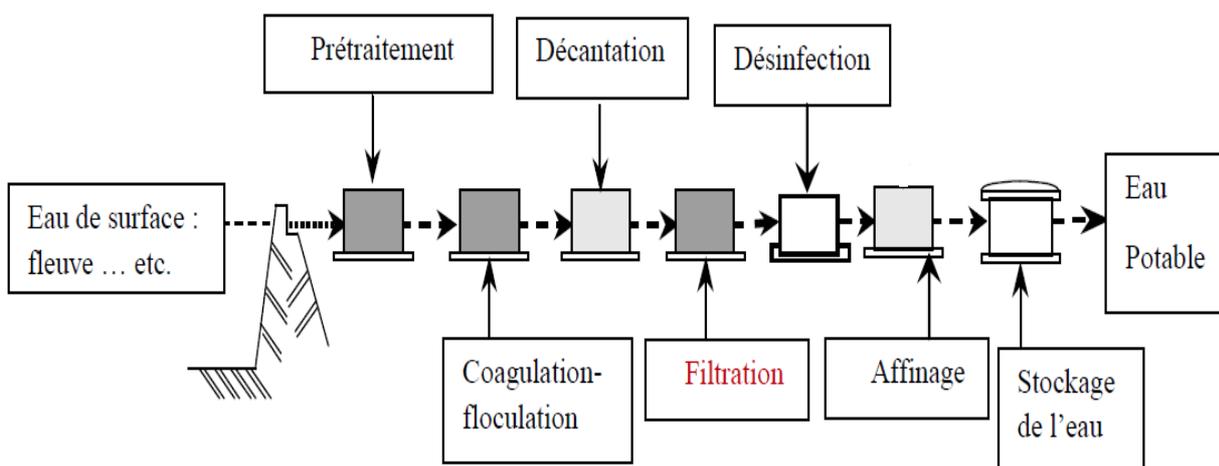


Figure 1.2 : Chaîne de traitement.

2. Description interne du procédé de filtration

2.1. Les spécifications requises

Les filtres destinés à l'épuration des eaux dans le traitement de l'eau, doivent respecter des cahiers des charges qui sont de plus en plus sévères en ce qui concerne l'efficacité, la capacité de rétention, la perte de charge, la durée de vie et l'encombrement. La qualité du filtre repose donc sur un choix judicieux du type de media filtrant ainsi que sur l'optimisation de la géométrie du filtre.

2.2. Turbidité de l'effluent

La turbidité est la mesure de l'aspect plus ou moins trouble de l'eau; c'est l'inverse de la limpidité. Techniquement, la turbidité correspond à la propriété optique de l'eau permettant à une lumière incidente d'être déviée (diffraction) ou absorbée par des particules plutôt que transmise en ligne droite. Elle est causée par diverses matières particulaires ou colloïdales composées de limon, d'argile, de composés organiques ou inorganiques ainsi que du plancton et d'autres micro-organismes. Les sources de matières particulaires peuvent être d'origine naturelle (acides humiques, particules provenant de la dégradation des végétaux ou de l'érosion du sol) ou anthropique (rejets industriels, agricoles et urbains). Dans le réseau de distribution, après le traitement de l'eau, la turbidité peut s'accroître par la post-floculation de coagulants résiduels dissous, la recroissance de micro-organismes, la remise en suspension de la matière déposée dans les canalisations ainsi que par la corrosion de la tuyauterie.

a) Méthodes d'analyse

La première méthode de mesure utilisée était le turbidimètre à bougie de Jackson, constitué d'une bougie à luminosité normalisée située sous un tube contenant l'eau à évaluer. Une unité Jackson de turbidité (UJT) correspond approximativement à la hauteur de la colonne d'eau à laquelle la flamme cesse tout juste d'être visible par le dessus de cette colonne.

Bien que l'on retrouve encore des références à la méthode de Jackson, des turbidimètres néphélométriques sont maintenant utilisés; ils mesurent l'intensité de la lumière déviée à un angle de 90° par rapport à la lumière incidente qui traverse en ligne

droite l'échantillon à analyser. Un angle de diffusion de 90° est celui qui est le moins sensible à diverses interférences comme la dimension et la forme des particules. Une suspension de formazine est habituellement utilisée comme étalon pour étalonner un néphélémètre. Il est cependant difficile de corrélérer la turbidité à une concentration massique de solides car la taille, la forme et l'indice de réfraction influent sur la diffusion de la lumière et sont sans lien avec la masse. C'est pourquoi la turbidité est évaluée en unités néphélométriques de turbidité (UNT) et non en termes de concentration de matières en suspension (MES) par volume d'eau (en mg/l, par exemple).

La limite de détection habituelle des néphélémètres utilisée dans les laboratoires est de l'ordre de 0,1 UNT, ce qui correspond à environ 20 particules/ml; une turbidité de 0,5 UNT équivaut à environ 1 000 particules/ml alors que 5 UNT correspondent à environ 20 000 particules/ml. Une turbidité supérieure à 5 UNT est généralement visible à l'œil, ce qui peut amener la majorité des consommateurs à rejeter une telle eau.

b) Technique de la réduction de la turbidité

La turbidité de l'eau brute est réduite aux normes ou seuils acceptables par la filtration employée dans les usines de traitement de l'eau potable. La filtration assistée d'un procédé chimique, comprend deux étapes. La première, appliquée au début du processus de traitement, est la coagulation/floculation qui consiste à ajouter des produits chimiques (sels d'aluminium et ferreux) qui provoquent l'agrégation des petites particules pour en former de plus grosses. Ces dernières sont par la suite interceptées lors du passage de l'eau dans les filtres à sable (ou d'autres matériaux granulaires). Ces traitements sont habituellement capables de produire une eau traitée ayant une turbidité de l'ordre de 0,3 UNT

2.3. La perte de charge

Il s'agit du deuxième paramètre important permettant d'évaluer la qualité du filtre. En effet, la durée de filtration dépend directement de l'évolution de la perte de charge occasionnée par le filtre au cours du procédé de filtration. Dans la pratique, une perte de charge maximale de fonctionnement du filtre est généralement fixée. La perte de charge se définit comme la différence de pression statique entre l'amont et l'aval du filtre, notées respectivement P_e et P_s .

$$\Delta P = P_e - P_s$$

Elle traduit la résistance hydraulique du filtre à l'écoulement du fluide. Celle ci ne doit pas dépasser un seuil fixé au risque de perturber le fonctionnement du système voire d'endommager le filtre, ce qui entraînerait un largage des particules capturées dans le circuit. Un effort important a donc été consenti ces dernières années afin, d'une part de chercher le meilleur compromis conduisant à un media caractérisé par une efficacité de filtration maximale tout en ayant une perte de charge minimale, et d'autre part, de minimiser l'évolution de la perte de charge liée au colmatage afin d'optimiser la durée de filtration.

2.4. Capacité de rétention

Elle représente la masse des particules retenues par le média filtrant jusqu'à l'obtention de la perte de charge maximale admissible. Sa valeur est donc directement reliée au degré de colmatage du filtre. Ces dernières années, de nombreuses études portant sur le choix de la nature et de la structure du média ont été faites dans l'optique d'augmenter la capacité de rétention, car celle-ci joue un rôle majeur sur la durée de f.

2.5. L'encombrement

Dans ce cas, l'encombrement prend une place importante dans la conception des filtres, dont l'objectif est d'avoir la plus grande surface de filtration pour un minimum de volume. Il est donc crucial que le filtre puisse à la fois répondre aux normes, notamment en terme de résistance aux fortes pressions. Le choix des matériaux est donc déterminant afin d'assurer une efficacité optimale et un longue durée de vie du filtre.

3. Les filtres à sable rapide :

3.1. Introduction

En pratique, les filtre à sables rapides sont les plus utilisés, les filtre à sables lents, de construction et de fonctionnement simples, nécessitent de grandes superficies, c'est pourquoi on les utilise surtout dans les payes en voies de développement ou le climat est moins rigoureux, et lorsque on est limité par l'espace. Les filtres sous pression et les filtres à terre diatomée servent surtout à traiter les eaux de piscine ou sont utilisés dans de petite unité de traitement préfabriquées.

Le filtre à sable rapide est le type de filtre le plus utilisé dans le traitement des eaux de consommation. Le matériau filtrant est maintenu en place par gravité et l'écoulement de l'eau a lieu de haut en bas. Lorsque le milieu filtrant est encrassé, on lave le filtre en inversant le sens de l'écoulement de l'eau ; le milieu filtrant est alors en expansion, et les particules d'impuretés, beaucoup moins denses que les grains de sable, sont décollées et évacuées vers l'égout à l'aide des goulottes de lavage. Les principaux éléments d'un filtre rapide sont : le fond de filtre, le gravier de support et le milieu filtrant.

- **Fond du filtre :** Le fond de filtre est la structure qui sépare le milieu filtrant de l'eau filtrée. Il doit donc être suffisamment solide pour supporter le milieu filtrant (1m de sable et de gravier) et l'eau située au-dessus du milieu filtrant (2m d'eau).

Il permet en outre :

- de collecter et d'évacuer les eaux filtrées.
- de distribuer uniformément l'eau de lavage.
- **Gravier de support :** Le gravier de support, situé immédiatement au-dessus du fond de filtre permet :
 - de retenir le sable du milieu filtrant ;
 - d'améliorer la répartition de l'eau de lavage dans le filtre.

L'épaisseur et les caractéristiques granulométriques de la couche de gravier de support dépendent des caractéristiques du fond de filtre et de celles du milieu filtrant.

- **Milieu filtrant :** Les matériaux filtrants les plus utilisés sont le sable et l'antracite. Les performances hydrauliques exigées d'un filtre à sable rapide sont nettement plus importantes que celles d'un filtre lent. En filtration lente, les exigences les plus importantes portant sur le sable sont la nature chimique. En filtration rapide, par contre, la performance repose sur une granulométrie plus aigüe. En effet les performances hydrauliques y sont plus cruciales et la nécessité d'une distribution granulométrique rigoureuse est un corollaire fondamental.

3.2. Distribution granulométrique du sable dans les filtres rapides :

Les caractéristiques granulométriques du sable de filtration sont particulièrement importantes vis-à-vis de la percolation (écoulement) de l'eau dans la masse du filtre.

3.2.1. Tamisage :

La détermination de la granulométrie d'un sable de filtration utilise une série de tamis superposés, le plus gros crible se trouvant au-dessus. Après une période d'agitation de 15 à 30 min, le poids de chaque classe retenue par chacun des tamis est déterminé. On calcule alors le poids pondéral des fractions granulométriques pour lesquelles le diamètre est plus petit que l'ouverture du dernier tamis à travers lequel elles sont passées.

La courbe granulométrique s'obtient sur un graphique dont l'axe des X reprend les mesures d'ouverture des tamis, et l'axe des Y les pourcentages pondéraux des fractions qui ont traversés lesdites ouvertures. Une autre façon consiste à dresser un diagramme bilogarithmique représentant le pourcentage pondéral des différentes fractions granulométriques en fonction de leur taille en mm. De cette manière, le résultat a souvent la forme d'une ligne droite. C'est toutefois la représentation directe qui sert le plus souvent à caractériser un sable de filtration.

3.2.2. Caractéristiques de la distribution granulométrique d'un sable de filtration :

Afin de caractériser un sable utilisé pour une filtration rapide, on utilise les concepts de taille effective, de diversité et de taille hydraulique moyenne. On emploie aussi un coefficient d'uniformité.

- a. **La taille effective** relevée du diamètre de tamisage et représente les 10% les plus fins de la quantité globale du sable. Généralement, la taille effective n'est pas inférieure à 0,5 mm en filtration rapide. Ce paramètre est capital pour les filtres qui sont lavés par un flux inverse d'air et d'eau mélangés. En effet, les lavages successifs produisent un reclassement granulométrique portant les fractions les plus fines vers le sommet du filtre. Dans ces zones de concentration de fines particules, le risque de colmatage est plus élevé.
- b. **La diversité à 60%** décrit la variété des classes granulométriques qui constituent 60% de la masse du sable. Cette amplitude renseigne sur l'homogénéité du matériau de filtration.
- c. **Le coefficient d'uniformité** est le rapport de la diversité à 60% à la taille effective. Dans les filtres rapides, le coefficient n'est jamais supérieur à 3 et, généralement, doit

y être inférieur à 2. Plus précisément, il devrait être inférieur à 1,5 si l'installation se voulait exemplaire.

- d. **Le diamètre hydraulique moyen d'un substrat de filtration** peut être déduit par calcul ou par construction graphique (diamètre nominal lié à la perméabilité du filtre)

3.2.3. Aspect dimensionnel du substrat de filtration :

Plusieurs paramètres relatifs à la constitution et à la forme des grains sont utilisés pour caractériser les substrats de filtration.

- a. **Matériau** : La silice constituant le sable des filtres a une densité de 2,65. Un matériau extrinsèque et granuleux, tel que du mica ou du calcaire, peut être pris pour du sable lors du tamisage. Il faut alors avoir recours à un teste de densité. Une procédure qui répond à la loi d'Archimède convient très bien. Le chloroforme a une densité de 1,48 et permet au sable d'y sédimenter. Par contre, le bromoforme avec une densité de 2,89, contraint le sable le sable d'y flotter. Des mélanges de liquides ont des densités intermédiaires, ce qui permet d'analyser les caractéristiques de l'immersion du substrat. La densité de celui-ci, éventuellement concassé, permet de caractériser sa pureté.
- b. **Importance des éléments lamellaires** : Dans les filtres rapides, aucun élément lamellaire, tel que le mica, n'est autorisé dans le substrat. L'importance de cette exigence repose sur le fait que les filtres rapides sont lavés par un mélange d'eau et d'air. Durant les lavages en retour, les éléments lamellaires remontent à la surface et contribuent à l'accélération de l'engorgement des filtres.
- c. **Facteur géométrique** : Le facteur géométrique interprète la différence entre la forme d'un grain moyen et d'une sphère parfaite. Il consiste en un coefficient qui nous oblige à une correction du choix des classes granulométriques déterminées par tamisage. Dans nos approximations de l'hydraulique au sein d'un filtre à sable, nous pouvons présumer d'un écoulement laminaire. Par conséquent, la résistance aux flux, c'est-à-dire la perte de charge, obéit aussi à la loi du flux laminaire et donc, dans ce cas, à la loi de Darcy. Selon celle-ci, la hauteur équivalente à la perte de charges, Δh , est une fonction linéaire de la vitesse de filtration et de profondeur du lit, h , et une fonction inverse de la perméabilité du substrat. Le coefficient k , ou coefficients de perméabilité, a les mêmes dimensions que celles de la vitesse. Il dépend d'une série de facteurs, tels que la température de l'eau (influent sur la viscosité), la porosité du

milieu filtrant et le facteur géométrique f , appelé aussi sphéricité du sable. Ce facteur géométrique est un nombre sans dimension et vaut 1 pour des grains parfaitement sphériques ou une valeur de plus petite au fur et à mesure de l'augmentation du caractère anguleux. Comme valeurs guides. Nous pouvons utiliser les données suivantes :

Géométrie du grain	Sphérique	Ronde	Anguleuse
f	1,00	0,90	0,75

Tableau 1.1: Exemple de valeurs du facteur géométrique en fonction de la géométrie du sable.

Les spécifications qui portent sur les particules de sable de filtration doivent viser, d'une part, des critères de composition et de pureté et, d'autre part, des paramètres précis de dimension et de géométrie afin de répondre à un usage déterminé.

Après de nombreux lavages, le sable a tendance à se stratifier, les grains les plus fins demeurent alors en surface et les impuretés sont arrêtées par la couche supérieure de filtre, qui est rapidement colmatée. Pour éviter ce problème, on peut utiliser un filtre constitué d'une couche de sable surmontée d'une couche d'anthracite. Les grains d'anthracite, plus légers et plus gros que les grains de sable, demeurent sur le dessus du milieu filtrant. Ainsi, les petites particules d'impuretés traversent facilement la couche d'anthracite et sont arrêtées par la couche de sable, tandis que les grosses particules sont arrêtées par la couche d'anthracite. Un filtre à sable et anthracite permet donc une meilleure utilisation du milieu filtrant, puisqu'on peut doubler la charge superficielle maximale (10m/h) sans augmenter la fréquence des lavages.

Les spécifications qui portent sur les particules de sable de filtration doivent viser, d'une part, des critères de composition et de pureté et, d'autre part, des paramètres précis de dimension et de géométrie afin de répondre à un usage déterminé.

3.3. Fonctionnement d'un filtre à sable rapide

Un filtre à sable rapide est peu efficace lorsque il doit traiter une eau n'ayant pas bénéficié d'une coagulation et d'une floculation. Un tel filtre élimine en effet difficilement les particules non absorbées par le floc, et ce même s'il est constitué d'une épaisse couche de sable fin.

Le floc contenu dans l'eau doit par ailleurs résister aux forces de cisaillement qui s'exercent dans le filtre, faute de quoi il se brise et pénètre plus profondément dans le milieu filtrant. En plus de la résistance du floc, les facteurs suivants peuvent affecter la qualité de l'eau filtrée :

- Caractéristique granulométrique du milieu filtrant ;
- Porosité du milieu filtrant ;
- Charge superficielle.

3.3.1. Variation de la turbidité et des pertes de charge

La turbidité de l'effluent d'un filtre et la perte de charge à travers le filtre sont les deux facteurs qui permettent de contrôler le fonctionnement d'un filtre. Ainsi, lorsque la perte de charge atteint une valeur de consigne prédéterminée ou que la turbidité de l'effluent du filtre dépasse une certaine valeur, on isole le filtre en question et on procède à un lavage. La période d'utilisation d'un filtre correspond donc à la durée entre deux lavages.

a. Variation de la turbidité

Dans le traitement qui permet de réduire la turbidité, la filtration est habituellement la dernière étape. L'effluent du filtre doit donc satisfaire aux normes sur l'eau potable. Rappelons que la turbidité de l'effluent du filtre en fonction du temps est en général représentée par une courbe semblable à celle de la figure (1.3). Au début de la période d'utilisation du filtre, la turbidité, relativement élevée, diminue rapidement pour atteindre un plateau. Ce plateau, maintenu pendant plusieurs heures, suivi d'un accroissement rapide de la turbidité. Lorsque la turbidité de l'effluent est l'unité néphélogrammétrique, on lave le filtre. On peut expliquer la valeur importante de la turbidité au début de cycle de filtration de la façon suivante : au début les petites particules du floc traversent facilement le filtre ; après une certaine période d'utilisation, les particules du floc arrêtées par le filtre adsorbent les particules fines. Le niveau du plateau et la durée de la période d'utilisation du filtre en fonction de la turbidité de l'effluent dépendent des facteurs décrits ci-dessous :

- Faible résistance du floc. La turbidité a la sortie du filtre est plus élevée et la période d'utilisation plus courte.
- Décantation déficiente .La turbidité à l'entrée du filtre est plus élevée et le période d'utilisation plus courte. Si le floc est très résistant, la turbidité de l'effluent demeure faible et les pertes de charges augmentent rapidement
- Augmentation de la charge superficielle. La valeur de forces de cisaillement qui s'exercent sur le floc à l'intérieur du filtre augmente .Si le floc n'est pas très résistant, la turbidité est plus élevée dans l'effluent du filtre et la période d'utilisation est plus courte.
- Augmentation de l'épaisseur du milieu filtrant. La période d'utilisation du filtre est plus longue (on suppose que la valeur de la perte de charge demeure inférieur a la valeur de la consigne).
- Remplacement d'une couche de sable par l'anhracite (diamètre plus grand, densité plus faible). Le pourcentage des vides dans le filtre augmente et la période est plus longue.

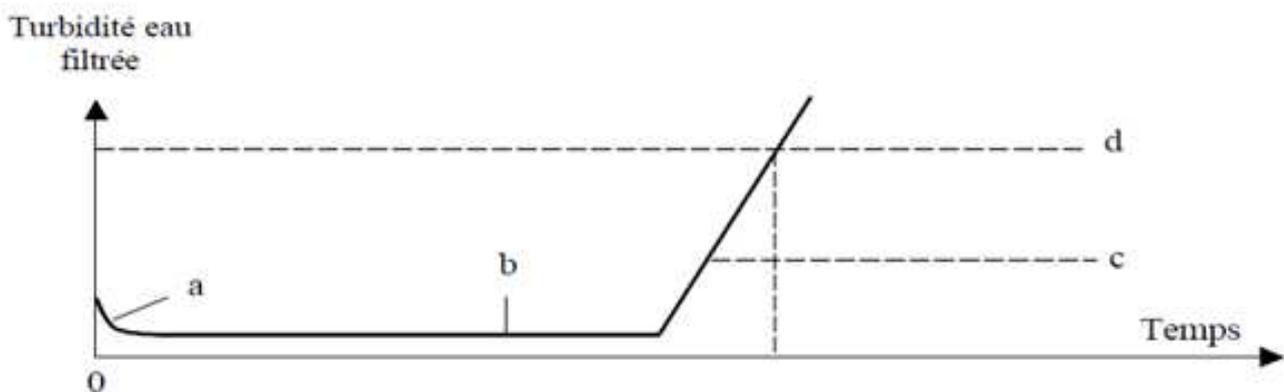


Figure 1.3 : Variation de la turbidité en fonction du temps.

Le graphique de la Figure(1.3) représente, de manière schématique, l'évolution de la turbidité de l'eau filtrée en fonction du temps. La première phase est la maturation du filtre (a), suivie de la période de fonctionnement normal (b). Lorsque la turbidité de l'eau filtrée augmente, cela correspond à un début de crevaisson de la masse filtrante (c) et l'on atteint alors la détérioration du lit filtrant et par la suite le filtre (d).

b. Variation des pertes de charge

Durant la filtration, le filtre s'encrasse et, par conséquent, la perte de charge augmente. Il faut veiller à ne pas dépasser la perte de charge maximale admissible par construction pour éviter une crevaison du filtre. Pour conserver un encrassement acceptable du filtre, il faut augmenter la « hauteur de couche » de celui-ci. Le temps pendant lequel on maintient un filtrat clair (eau filtrée) est proportionnel à cette « hauteur de couche ».

On peut facilement mesurer la perte de charge totale à travers à l'aide de deux conduites transparentes installées verticalement dans la galerie des filtres. Une est reliée à l'affluent du filtre (si celui-ci est submergé) et l'autre, à l'effluent. La différence des niveaux dans ces deux conduites correspond à la perte de charge.

La variation des pertes de charge totales en fonction du temps de filtration fournit des indications sur le fonctionnement d'un filtre. Ainsi, des pertes de charge initiales plus élevées après plusieurs lavages révèlent que le filtre est probablement mal lavé ou que les drains et le gravier de support sont en train de se colmater. Le taux d'augmentation de pertes de charge en fonction du temps permet en outre de déceler plusieurs défauts de fonctionnement. Ainsi, pour une vitesse de filtration constante on peut obtenir plusieurs courbes et en déduire plusieurs problèmes de fonctionnement du filtre figure (1.4).

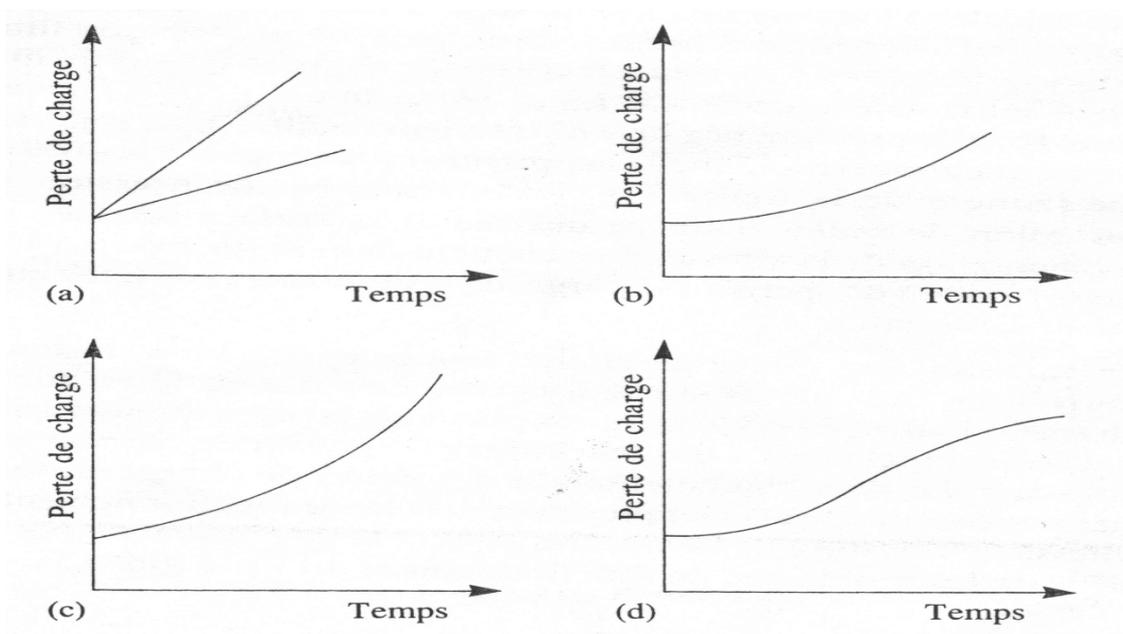


Figure 1.4 : Variation des pertes de charges en fonction du temps

- Courbe droite (fig1.4a)

L'élimination des particules a lieu dans toute l'épaisseur du milieu filtrant. Dans ces conditions, une augmentation de la charge superficielle entraîne un accroissement de la perte de charge initiale et une augmentation rapide de la perte de charge ; la période d'utilisation du filtre est alors plus courte.

- Courbe droite de pente plus élevée (fig1.4a)

Il ya augmentation de la turbidité dans l'effluent, et ce sans augmentation de la charge superficielle.

- Courbe avec une légère courbure vers le haut (fig1.4b)

L'élimination d'une partie des impuretés a lieu en profondeur.

- Courbe avec une forte courbure vers le haut (fig1.4c)

L'élimination des particules d'imputés a surtout lieu a la surface du filtre.

Dans ce cas , pour augmenter le durée de la période d'utilisation , on peut soit accroitre du grain du matériau filtrant (a la surface du filtre) en remplaçant une couche de sable par une d'anthracite , soit accroitre la charge superficielle afin d'augmenter la valeur de forces de cisaillement et de forcer ainsi la diffusion des impuretés a l'intérieur du filtre .

- Courbe avec courbure vers le bas (fig1.4d)

L'élimination de la turbidité est déficiente ; il ya donc risque de la détérioration de la qualité de l'effluent.

3.3.2. Optimisation de l'utilisation du filtre

Pour optimiser l'utilisation du filtre, on le faire fonctionner de telle sorte que , lorsque la turbidité de l'effluent atteint sa valeur maximale permise , les pertes de charge atteignent , elle aussi , leurs limites maximales permises figure (1.5)

L'utilisation du filtre n'est optimale lorsque les deux situations ci-dessous se produisent.

- Les pertes de charge atteignent leur valeur maximales alors que la turbidité est toujours faible .Pour corriger cette situation, on accroitre la charge superficielle afin d'augmenter la valeur de forces de cisaillement (et permettre ainsi une meilleur pénétration du floc), soit augmenter le diamètre effectif.
- La turbidité atteint sa valeur maximale alors que les pertes de charge sont toujours faibles. Pour corriger cette situation, on peut soit réduire la charge superficielle afin de ne pas briser le floc, soit additionner un polymère destine à renforcer le floc, soit diminuer le diamètre effectif du milieu filtrant.

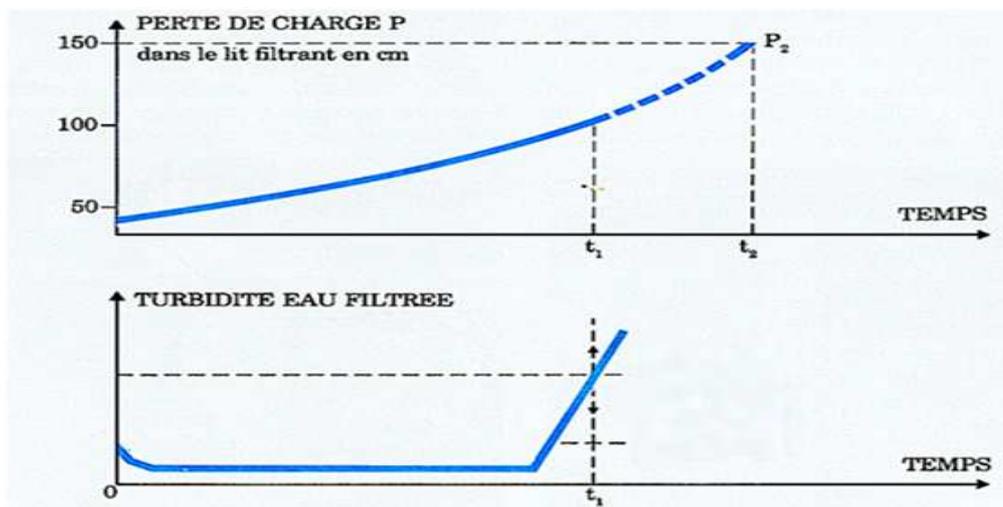


Figure 1.5 : Variation de la perte de charge et de la turbidité en fonction du temps.

3.3.3. Lavages des filtres :

Lorsque les pertes de charges, la turbidité, ou les deux, atteignent leurs valeurs maximales, on lave le filtre en injectant de l'eau par le fond.

a. Mécanisme de lavage

Lorsque l'eau de lavage est injectée par le fond, le milieu filtrant prend de l'expansion et libère les particules arrêtées par le filtre. Ces particules, beaucoup moins denses que les grains de sables, sont aisément entraînées vers les goulottes de lavage. Le niveau maximal de lavage du sable en expansion atteint 8 à 30 cm au-dessus de son niveau au repos. Le degré d'expansion du milieu filtrant dépend :

- du diamètre des grains du sable ;
- de la densité des grains du sable ;
- de la charge superficielle, ou de vitesse, de l'eau de lavage ;
- de la température de l'eau.

La charge superficielle la plus utilisée est de 37m /h. Il est important de signaler que, si l'eau de lavage est injectée brusquement dans un filtre, la totalité de la couche de sable peut être soulevée au-dessus de la couche de gravier, ce qui provoque un bouillonnement pouvant entraîner le déplacement de gravier de support.

b. Mécanismes de brassages auxiliaires

La plus part des impuretés qui encrassent un filtre adhérent aux grains de sable ; elles ne sont donc pas éliminées par un simple lavage à l'eau. Pour décoller ces impuretés, il faut augmenter la turbulence dans le milieu filtrant en expansion ; on favorise ainsi le frottement des grains de sable les uns contre les autres et, par conséquent, le décollement des impuretés. Or, on ne peut pas augmenter la charge superficielle au-delà de certaines limites ; en effet une charge superficielle trop élevée provoque une expansion excessive du milieu filtrant et, par le fait même, des pertes de sable ; de plus il faut alors utiliser des quantités plus importantes d'eau de lavage. Donc, pour augmenter la turbulence la charge dans le milieu filtrant en expansion sans accroître la charge superficielle, on peut soit injecter de l'air, soit utiliser des agitateurs.

c. Lavage à l'eau et à l'air :

On injecte simultanément, par le fond du filtre, de l'air et de l'eau. L'eau entraîne les impuretés vers les goulottes de lavage alors que l'air assure un brassage suffisant pour décoller ces impuretés. La charge superficielle (air) doit être supérieure à 5 m/h. Signalons qu'il n'est pas nécessaire que le milieu filtrant soit en expansion pour que le lavage soit efficace.

Dans le cas d'un filtre au sable et à l'antracite, il faut d'abord abaisser le niveau de l'eau jusqu'au niveau supérieur de la couche d'antracite, puis n'injecter que de l'air, puisqu'il est impossible d'injecter de l'air quand le niveau de l'eau dans le filtre atteint les goulottes de lavage, ou d'injecter l'eau de lavage en même temps que l'air. Dans ces deux cas, en effet, il se produit un entraînement massif de l'antracite vers les goulottes de lavages. Lorsque les impuretés sont décollées, on arrête la soufflante et on injecte l'eau de lavage. La vitesse de l'eau de lavage, ou charge superficielle, est alors de 37 m/h ou plus, car seule une vitesse élevée permet de chasser les impuretés vers les goulottes et de reclasser le matériau filtrant.

d. Lavage à l'eau seule :

Lorsqu'on lave un filtre rapide uniquement avec de l'eau, le brassage est assuré par des laveurs de surface, qui peuvent être soit fixes, soit rotatifs. Chaque type de laveur envoie des jets de 3mm de diamètre faisant un angle de 15 à 30 ° vers le bas avec l'horizontale. La pression de ces jets, situés à 5cm au-dessus du niveau du sable, est d'environ 515 Kpa. La quantité d'eau injectée par les jets est de 80 à 160L/m².min⁻¹ pour les laveurs fixes et de 20L/m².min⁻¹ pour les laveurs rotatifs.

En générale, on met en action les laveurs de surface avant d'injecter l'eau de lavage par le fond du filtre, car permet de briser la croute d'impuretés qui s'est formée à la surface du filtre. On peut par ailleurs injecter une faible quantité d'eau de lavage avant de mettre les valeurs de surface en action afin que le milieu filtrant prenne légèrement de l'expansion.

Lors de lavage d'un filtre multicouche (sable et anthracite), il est recommandé de donner de l'expansion au milieu filtrant jusque bien au-dessus des laveurs de surface, faute de quoi la turbulence engagée par ces derniers entraîne des grains d'anthracite vers les goulottes de lavage.

Lorsque le brassage du sable est insuffisant, les particules d'impuretés arrêtées à la surface du filtre ont tendance à s'agglomérer ; les agglomérats ainsi formés (Mud Balls), trop lourds pour être entraînés lors de lavage, demeurent donc à la surface du filtre. Par ailleurs, lorsque leurs masse est assez importantes, ils s'enfoncent dans le sable lors des lavages.

Dans un filtre à sable et anthracite, les agglomérats de boue ont tendance à s'accumuler à l'interface sable-anthracite. Pour éliminer ce problème. On peut installer des laveurs à double niveau qui envoie des jets à environ 15 cm au-dessus du sable et à 5cm au-dessus de l'anthracite.

3.4. Les filtres AQUAZUR type V

La caractéristique commune à tous les filtres AQUAZUR réside dans la mise en œuvre d'une couche filtrante unique de sable homogène, qui reste homogène après son lavage par retour simultané d'air et d'eau, sans mise en expansion du lit filtrant. Actuellement, les filtres AQUAZUR à faible hauteur d'eau et de sable, en opération à travers le monde, ont consacré la parfaite adaptation de leur conception aux vitesses de filtration généralement comprises entre 5 et 8m/h voire 10m/h. Issus de la même technique, le filtre AQUAZUR type V est le type même du filtre ouvert adapté aux grandes vitesses de filtration, de 7 à 30m/h, pour le traitement des eaux potables, industrielles ou résiduaires. Sa conception nouvelle répond aux trois impératifs fondamentaux d'un filtre à grande vitesse :

- Production d'une eau filtrée d'une haute qualité tout au long du cycle de filtration.
- Durée de fonctionnement maximale conduisant à des frais d'exploitation les plus bas et à un minimum d'intervention pour le lavage.

- Lavage basé sur l'utilisation de trois fluides, L'air surpressé, l'eau filtrée et l'eau à filtrer, assurant le maximum d'efficacité pour une perte d'eau et une consommation électrique minimale.

3.4.1. Description et caractéristiques du filtre AQUAZUR type V :

a. Alimentation sur toute la longueur de la cellule filtrante

L'eau à filtrer est amenée à la batterie filtrante (ensemble de filtres) par un canal général, dont la liaison avec chaque filtre est essentiellement fonction du mode de régulation retenue. Avec une régulation du débit filtré, en fonction du niveau de l'eau sur le filtre, l'eau est équirépartie entre l'ensemble des filtres en service par un ensemble orifice-déversoirs qui assure une très bonne précision d'équirépartition.

b. Milieu filtrant

Caractéristique du sable :

Etant donné que le lavage du filtre s'effectue sans mise en expansion, la granulométrie du sable n'est pas choisie en pensant à la limitation du débit de retour d'eau de lavage, pour raisons d'économie-comme c'est souvent le cas pour les filtres lavables par mise en expansion. Cette granulométrie est adaptée à la nature des matières à retenir, au traitement pratiqué, à l'usage d'adjuvant ou de poly électrolytes spécifiques et à la qualité de l'eau filtrée désirée.

Le sable filtrant répond aux spécifications usuelles suivantes :

- taille effective généralement comprise entre 0,95 et 1,35 mm, avec possibilité d'extension entre 0,7 et 2mm.
- coefficient d'uniformité généralement compris entre 1,2 et 1,6 avec extension possible à 1,8.
- faible friabilité, et perte en poids, après 24 heures de contact avec une solution d'acide chlorhydrique à 20%, d'ordinaire inférieure à 2%.

Ces caractéristiques assurent le maintien en état du lit filtrant dans le temps ainsi que l'obtention d'une eau filtrée de haute qualité pendant des cycles prolongés de filtration.

Hauteur du sable :

La hauteur du sable est variable entre 0.95 mètre et 1.50 mètre pour des vitesses de filtration comprises entre 7 et 20m/heure. Elle peut être encore augmentée pour les vitesses supérieures. En période de filtration, la hauteur d'eau au-dessus du sable est d'ordinaire de 1.20 mètre, alors qu'en période de lavage elle est réduite à 0,50 mètre. Cette valeur évite les pertes de sable pendant le lavage et réduit le temps de lavage par diminution au minimum possible du volume d'eau surmontant le sable.

c. Fond du filtre

Le plancher filtrant non colmatable sur lequel repose la couche de sable est équipé d'un réseau très dense de buselures à longue queue, environ 55 par mètre carré, qui assurent un drainage optimal de toute la surface du lit filtrant ainsi qu'une parfaite équirépartition de l'eau filtrée comme de l'eau et de l'air de lavage, pour une perte de charge limitée.

d. Cellule simple ou double

Un filtre AQUAZUR est constitué soit d'une cellule simple rectangulaire quand de faibles surfaces sont requises, soit de cellules doubles rectangulaires pour atteindre de grandes surfaces de filtration. Les filtres à simples cellules comportent sur l'une de leur longueur la goulotte en « V » d'alimentation et de balayage, et sur l'autre longueur la goulotte d'évacuation des eaux de lavage, goulotte noyée en filtration.

Les filtres à doubles cellules comportent deux goulottes en V et une goulotte centrale d'évacuation des eaux de lavage. Les deux cellules, en communication par leur surface et par leurs faux fonds, sont assurées d'un encrassement identique.

e. Espace accessible sous le plancher

Il assure en filtration comme en lavage, une pression égale en tout point sous plancher évitant des dispositifs compliqués d'équirépartition créateurs de pertes de charges et susceptible d'obturation partielle non contrôlable

f. Lavage a l'eau et a l'air avec balayage de surface

Le lavage de la couche unique de sable s'effectue , après de la tranche d'eau supérieure , par l'utilisation de concomitante d'un retour d'air surpressé et d'eau filtrée , suivi d'un rinçage a l'eau filtrée , avec l'utilisation pendant ces deux périodes , d'un balayage de

surface utilisant l'eau à filtrer .La vidange de la tranche d'eau supérieure peut s'effectuer par filtration avec arrêt d'alimentation du filtre, ou par ouverture de la vanne de la mise a l'égout de la goulotte d'évacuation des eaux de lavage.

Le retour simultané d'air surpressé et d'eau filtrée avec balayage de surface assure l'efficacité du lavage .Il provoque une vibration et un frottement des grains de sable les contre les autres, qui en détachent les impuretés agglomérées. Ce retour conjoint d'air et d'eau amène ces impuretés en surface ou elles sont évacuées par débordement dans las goulottes d'évacuation des eaux de lavage.

Pendant cette phase, il n y pas de mise en expansion général du lit filtrant et donc pas de classement hydraulique des grains suivant leur taille. Plus le débit d'eau est important, tout en restant inférieur de celui de la mise en expansion du sable, plus le lavage est efficace est rapide : c'est ce qui réalisé dans les filtre AQUAZUR type V dans les déversoirs d'évacuations des eaux de lavage sont profilés pour éviter une perte de sable.

L'introduction d'eau a filtrer , par des trous pratiqués a la base de la goulotte en 'v' situé face a la goulotte de l'eau de lavage , assure un balayage en surface qui pousse en éliminant tout point à vitesse horizontale nulle ou les particules détachées pourrait redécanter .

La phase finale du lavage consiste a un rinçage a l'eau seule au même débit de retour d'eau filtrée que celui utilisé pendant le soufflage air-eau .Ce rinçage s'effectue dons toujours sans expansion .Son objet est d'achever la mise a l'égout des impuretés restant dans la tranche d'eau supérieur .Là encore le balayage en surface joue un rôle d'accélération du rinçage ; en utilisant l'eau à filtrer, ce balayage conduit a une réduction de consommation d'eau filtrée de lavage et donc a une économie d'énergie électrique de pompage .L'avantage supplémentaire de ce balayage à l'eau à traiter est de diminuer et même dans certains cas d'annuler, pendant le lavage d'un filtre, toute pointe de débit sur les autres filtres.

A la fin du lavage, le lit filtrant ne contient plus que l'eau filtrée claire, ce qui permet d'obtenir une eau filtrée d'excellente qualité dès la remise en service.

Le lavage de filtre AQUAZUR type V est particulièrement efficace, évite tout risque de formation de boules de boues au sein du lit filtrant. Il conduit à une économie d'eau de lavage et d'électricité, en raison des faibles débits mis en œuvre pendant des temps limites d'ordinaire entre 8 et 10 minutes. De plus, le fait de n'avoir pas à assurer une mise en expansion du lit filtrant évite d'avoir à ajuster le débit d'eau de lavage en fonction de la

température, il suffit d'utiliser une pompe de lavage fournissant le débit désiré. Sans qu'il soit nécessaire de prévoir un réservoir surélevé d'eau de lavage, avec mesure, régulation et organes d'ajustement de ce débit. L'économie qui en résulte est importante.

g. Vannes d'équipements

Le filtre AQUAZUR V comporte quatre vannes principales : la vanne de sortie d'eau filtrée, la vanne d'entrée d'eau de lavage, la vanne d'entrée d'air de lavage et la vanne d'évacuation des eaux de lavage. On peut s'y ajouter une vanne ou des obturateurs sur l'alimentation en eau décantée.

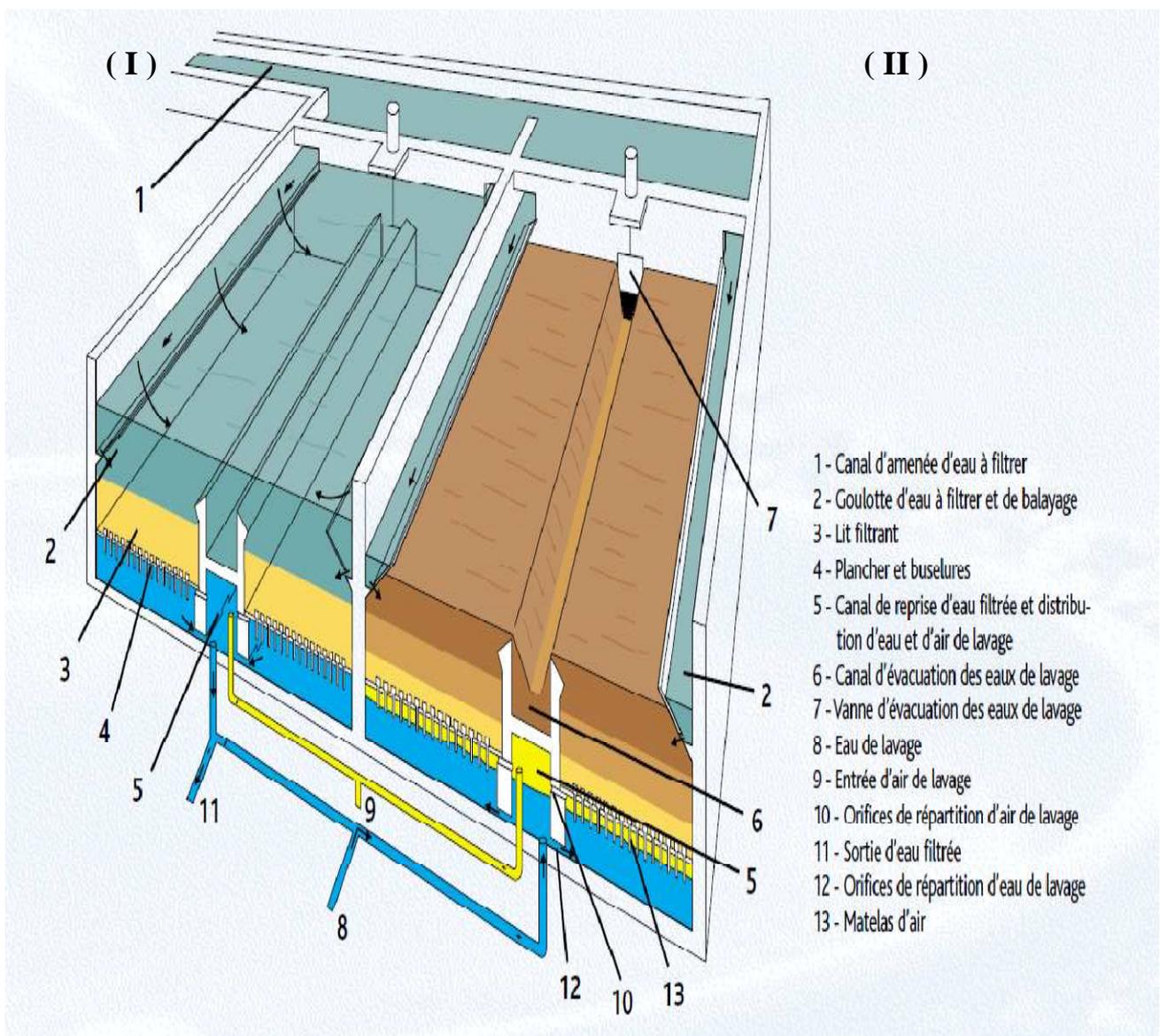
En commande automatique ou assistée, ces vannes sont du type à papillon étanche, et sont commandées par vérin pneumatique. La vanne de sortie d'eau de lavage peut être, dans s'ajoutent la vanne d'évacuation du matelas d'air après lavage, qui peut être également à commande automatique, et la vanne manuelle de vidange du filtre.

e. Régulateur

Tous les types de régulation s'adaptent à ce filtre. Cependant, la qualité de l'eau filtrée est autant fonction des caractéristiques du filtre que de son dispositif de régulation. Celui-ci ne doit pas provoquer de variations brutales de débit, ne pas fonctionner par à-coups, ne pas engendrer de pompage et ne pas être trop sensible, facteurs entraînant détérioration de la qualité de l'eau filtrée et la crevaison prématurée de filtre.

3.4.2. Avantages du filtre AQUAZUR V

Le filtre AQUAZUR V est donc un filtre spécifiquement adapté à la pratique de grandes vitesses de filtration, à tous les modes de régulations et d'automatisme de commandes désirée. Sa simplicité d'exploitation et l'efficacité de son lavage sont les meilleurs garants de la constance de la qualité de l'eau filtrée qu'il délivre.



(I) Filtre en période de filtration

(II) Filtre en période de lavage

Figure 1.6: Schéma du filtre AQUAZUR type V.

4. Conclusion

La filtration sur sable est une technologie de fractionnement économique et de première importance dans l'horizon d'une station de traitement. Cette opération s'associe aux autres étapes du traitement actif, comme la désinfection, la stérilisation, la coagulation-floculation, etc.

La filtration sur sable est généralement subdivisée en filtration rapide et lente. Cette distinction, bien que conceptuelle conventionnelle, est bien concrétisée dans ses applications.

La filtration lente est une fidèle imitation du processus naturel d'infiltration et, de ce fait, constitue une étape introductive à la démarche de recharge artificielle des nappes aquifère. La filtration rapide, généralement dépourvue d'implication biologique, est un processus plus artificiel qui, dans une station de traitement, offre un avantage économique indéniable.

Le but d'une filtration rapide est l'obtention d'une eau dont la concentration en matière en suspension est inférieure à $50 \mu\text{g/L}$ (et impérativement inférieur à g/L). La turbidité après filtration, selon les normes Allemandes, doit être inférieur à 0.5, voir 0.3 ppm SiO_2 , soit environ 4 gouttes de mastic (norme française). Selon les normes ou les critères de qualités, le contenu en fer ou en aluminium d'une eau, qui a préalablement coagulée et floculée, doit être inférieur à $50 \mu\text{g/L}$. En conséquence, une eau qui a subi les opérations de coagulation-floculation-décantation doit impérativement contenir moins de $100\mu\text{g/L}$ de fer ou d'aluminium en solution après filtration rapide. Il en est de même pour une eau traitée par floculation-filtration. Si cela n'était pas le cas, il faudrait alors revoir le mode de filtration et définir des pratiques plus appropriés.

Chapitre 2

Modélisation du procédé de filtration

Introduction

En raison d'une meilleure productivité et d'une meilleure rentabilité, les systèmes technologiques sont dotés de systèmes de commande autonomes soit élémentaires ou bien sophistiqués c'est-à-dire avec une intégration de l'automatisation plus intelligente et plus poussée. Cependant, l'automatisation de processus technologiques de production s'accompagne souvent de nombreuses tâches. Les tâches qui préoccupent l'automaticien sont l'analyse du comportement du processus et la conception du système de commande ou d'un correcteur. L'analyse et la synthèse d'un correcteur nécessite de modéliser correctement le système à commander. Le modèle mathématique exploité à des fins d'analyse doit être très précis et reproduire de manière fidèle la réalité du procédé. Par contre, le modèle destiné à la conception du système de commande peut ne pas reproduire certains comportements jugés, après analyse, non influents sur la commande du système et les objectifs de commande à atteindre. Nous pouvons citer par exemple, certaines non linéarités, les dynamiques rapides, Dans tous les cas, l'obtention d'un modèle mathématique est une étape importante dans la conception des systèmes.

Dans ce chapitre, on se propose la construction d'un modèle déterministe du procédé de filtration et sa validation en le comparant au procédé réel. Ce modèle s'appuie essentiellement sur la théorie des systèmes linéaires à paramètres variant LPV, et aussi sur l'intégration d'un paramètre identifiable (modèle mixte).

Dans ce chapitre on a utilisé les références bibliographiques suivantes : [04], [05], [10].

Remarque :

Dans la suite de notre mémoire nous avons omis de faire apparaître explicitement la variable temps t dans les grandeurs qui dépendent du temps, et ce pour des raisons de simplification de notations.

1. Equations physiques

1.1. Loi de Darcy

a. Introduction

La loi de Darcy est notamment utile pour caractériser les écoulements souterrains de l'eau. On l'utilise donc fréquemment dans des milieux poreux comme, c'est le cas, dans un filtre à sable rapide. Dans cette partie, en partant de la loi de Darcy dans un milieu poreux homogène, nous tenterons de calculer le débit traversant celui-ci.

b. Enoncé de la loi

La loi de Darcy régissant l'écoulement stationnaire d'un fluide incompressible de viscosité μ exprimée en Pascal seconde (Pa.s) à travers un milieu poreux de perméabilité K est :

$$U = \frac{\text{permeabilité}}{\mu \cdot L} \Delta P$$

Où U est la vitesse d'écoulement et ΔP est la perte de charge.

Nous exprimons donc la perte de charge à travers l'ensemble (support filtrant + gâteau accumulé) qui est assimilé à un lit de particules, par l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{(E_s + E_g)\mu}{\text{permeabilité}} \cdot U$$

La vitesse du fluide étant le rapport du débit volumique du filtrat sur la section totale du support filtrant S à traverser. Le débit volumique du filtrat étant le rapport $\frac{dV}{dt}$

Où V est le volume du filtrat obtenu. D'où la relation suivante :

$$Q_f = S \cdot U$$

Avec :

S : section de support filtrant en m^2 .

U : vitesse d'écoulements de fluide en m/s .

Q_f : représente le débit volumique du filtrat exprimé en m^3/s .

L'expression obtenue par la loi de Darcy devient alors :

$$\Delta P = \frac{(E_s + E_g)\mu}{\text{permeabilité} \cdot S} \cdot Q_f$$

Les fluides contenus dans un filtre rapide sont soumis exclusivement à la pression atmosphérique. Ainsi pour appliquer la loi de Darcy, nous choisirons la pression atmosphérique comme origine. La pression « P » ne dépend plus alors que de la pression exercée par la hauteur d'eau :

$$P = \rho g \cdot h$$

Où ρ est la masse volumique du fluide en (Kg/m^3) et g l'accélération de la pesanteur en (N/Kg). L'axe h exprimé en (m) est vertical orienté vers le haut.

On obtient alors l'équation aux dimensions suivante :

$$[\text{N}/\text{m}^2] = [\text{Kg}/\text{m}^3] \cdot [\text{N}/\text{Kg}] \cdot [\text{m}]$$

Avec :

$$P (\text{bars}) = 10^{-5} P (\text{N/m}^2) \quad \text{et} \quad \rho g = 10^4 \text{ N/m}^3$$

Nous aboutissons à la relation suivante :

$$P (\text{bars}) = 0.1 \cdot h (\text{mètres})$$

La perméabilité caractérise le gâteau. Elle dépend du diamètre des particules, de leur forme et de la porosité (fraction de vide) du gâteau ε . Les relations ainsi obtenues permettent de constater que si la perte de charge ΔP est constante, une augmentation de l'épaisseur du gâteau au cours du temps va entraîner une diminution de u et donc du débit de filtration.

Ce qui nous ramène à exprimer le débit de filtration par la relation suivante :

$$Q_f = \frac{\text{permeabilité}}{(E_s + E_g)\mu} \cdot S \cdot \rho g \cdot \Delta h$$

Nous considérons donc :

$L = (E_s + E_g)$: La longueur du support filtrant exprimé en m

$K = \frac{\text{permeabilité}}{\mu} \rho g$: La conductivité hydraulique exprimée en m/s

La considération des nouveaux paramètres donne naissance à la formule simplifiée suivante :

$$Q_f = K \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Où $\frac{\Delta h}{L}$ est appelé gradient hydraulique qui est sans dimension.

c. Modélisation de la perméabilité d'un milieu granuleux

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'évolution de la perméabilité en fonction des caractéristiques du milieu granuleux, tels que la porosité ou le diamètre effectif des grains.

Parmi eux, on peut citer Kozeny-Carman (1938), Davies (1952) et Chen (1955). On distingue aujourd'hui plusieurs modèles de perméabilité basés sur différents types d'approche.

- **Les modèles empiriques**

Les travaux concernant les écoulements fluides à travers des empilements aléatoires de grains représentatifs du milieu granuleux sont limités. La complexité du milieu rend en effet difficile l'obtention d'une loi analytique d'écoulement. L'approche expérimentale reste encore la mieux adaptée pour traiter ce type de problème. Ainsi dans notre cas, nous avons opté à utiliser l'identification pour déterminer la courbe d'évolution de la perméabilité en fonction du temps et procéder ensuite à la méthode d'interpolation pour aboutir à une formule littérale de la perméabilité en fonction du temps de filtration.

1.2. Pertes de charge

a. Pertes de charges linéaires (régulières) dans les tuyaux pour l'eau

De nombreux auteurs, dont Prony, Flamant, Darcy et Lévy, ont proposés pour le calcul de ces pertes de charges des formules empiriques basée sur un certain nombre d'essais pratiques avec des types de tuyauteries et de joints ne correspondant plus aux fabrications modernes.

D'autre part ces formules d'application limitées, ne reflètent pas la réalité physique des phénomènes et les résultats obtenus sont parfois très approximatifs.

La perte de charge régulière ΔH_r d'une conduite cylindrique dont les sections terminales S1 et S2 sont distantes de la longueur L, s'exprime en tenant compte de l'expression :

$$\Delta H_r = H_1 - H_2 = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g}$$

En supposant que la conduite cylindrique est de section constante, ce qui correspond à $v_1=v_2$, il vient :

$$\Delta H_r = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g}$$

L'analyse dimensionnelle propose, pour la perte de charge régulière, l'expression suivante :

$$\Delta H_r = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.1)$$

Où :

λ : coefficient de la perte de charge régulière(ou encore appelé coefficient de Fanning).

L : longueur de la conduite en m.

D : le diamètre de la conduite en m.

v : la vitesse débitante en m/s.

g : accélération due à la pesanteur exprimée en m/s².

Le coefficient λ de perte de charge régulière dépend de plusieurs paramètres :

- La géométrie de la conduite, nature de la section (Circulaire, annulaire, ...), état de la surface définit par la rugosité relative.
- Le régime de l'écoulement définit par le nombre de Reynolds Re_D .

Dans le cas d'un régime laminaire, il est possible de déterminer des relations exactes pour le coefficient de perte de charge. Pour un écoulement dans les conduites industrielles circulaires, où le nombre de Reynolds $Re_D < 2400$, on utilise la formule de Poiseuille :

$$\lambda = \frac{64}{Re_D}$$

b. Pertes de charge singulières

Dans la plupart des circuits hydrauliques, de nombreux éléments font obstacles au fluide, diminuant sensiblement son énergie. Ce sont les singularités présentes dans un circuit hydraulique.

La perte de charge singulière ΔH_S d'un composant hydraulique peut être exprimée grâce à l'analyse dimensionnelle de la façon suivante :

$$\Delta H_S = H_1 - H_2 = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.2)$$

Avec k le coefficient de perte de charge singulière. Quand la singularité est un rétrécissement ou un élargissement, la vitesse V à considérer est **la vitesse maximale** entre l'entrée et à la sortie de la singularité

c. Détermination des pertes de charge du circuit hydraulique :

Soit un circuit hydraulique composé de N_r tronçons de diamètre D_i et de N_s singularités en série, la perte de charge totale est donnée par :

$$\Delta H_{\text{tot}} = \sum_i^{N_r} \lambda_i \cdot \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + \sum_j^{N_s} k_j \cdot \frac{v_j^2}{2 \cdot g}$$

d. Localisation et quantification de différentes formes de pertes de charge au niveau du filtre

- **Pertes de charge engendrée par le lit (support) filtrant :**

La chute de pression causée par le sable filtrant est définie précédemment par la loi de Darcy.

- **Pertes de charge locales :**

On distingue une succession de trois singularité qui se situe au niveau du tronçon reliant la sortie du filtre au déversoir ; qui sont respectivement : un **rétrécissement** à la sortie du filtre, une **vanne** papillon et un **élargissement** à l'entrée du déversoir.

- **Pertes de charge régulière :**

Les pertes de charge régulières ou bien linéaire se situe essentiellement au niveau de la conduite (tronçon) raccordant le filtre au déversoir.



Figure 2.1 : Image de la conduite reliant le filtre au déversoir.

- e. **Hypothèse simplificatrice :**

- Le tronçon de la conduite reliant le filtre et le déversoir est caractérisé par un rétrécissement suivi d'un élargissement au point où la vanne est montée. La réduction sert à uniformiser la vitesse d'écoulement des particules d'eau qui arrivent vers la vanne ce qui engendre un régime laminaire au niveau de la singularité (élimination des bulles d'air qui peuvent nuire à la vanne), l'élargissement a pour objectif de ralentir ces particules lorsqu'elles sortent de la vanne régulatrice (protection des ouvrages génie civil des surpression).

La réduction a donc pour effet d'augmenter la vitesse d'écoulement cependant que l'élargissement réduit cette vitesse. De ce fait, on pourra considérer que l'élargissement compense la réduction. Ce qui nous ramène à obtenir un tronçon avec une section uniforme (section de la vanne régulatrice).

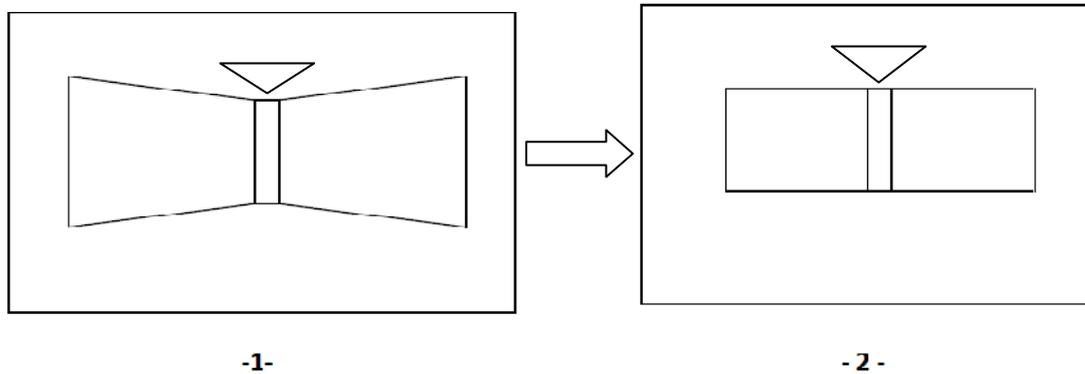
Schéma de la simplification :

Figure 2 .2 : Schéma de la Simplification de la réduction et de l'élargissement au niveau de la conduite.

- Les pertes de charges linéaires dépendent de plusieurs paramètres comme la nature de la conduite, son diamètre et sa longueur. Dans notre cas, une deuxième simplification consiste à négliger totalement les pertes de charges linéaires dans la conduite vue la longueur réduite du tronçon reliant le filtre au déversoir.

f. Expression de la perte de charge résultante

La perte de charge totale est donnée par :

$$\Delta H_{\text{totale}} = \Delta H_{\text{singulières}} + \Delta H_{\text{régulières}}$$

Après simplification on obtient :

$$\Delta H_{\text{totale}} = \Delta H_{\text{vanne}} \Rightarrow \Delta H_{\text{totale}} = k \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Ou bien

$$\Delta P_{\text{totale}} = k \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

Avec

ρ : masse volumique exprimée en kg/m^3 .

v : vitesse d'écoulement du fluide (l'eau) exprimée en m/s .

g : accélération due à la pesanteur exprimée en m/s.

k : coefficient de perte de charge qui varie en fonction de l'angle d'ouverture de la vanne.

g. Expression de débit sortant en fonction des pertes de charge :

Etant donnée la relation suivante :

$$Q_s(t) = v(t) \cdot S(t)$$

Avec :

S: section d'écoulement exprimée en m².

Le débit sortant s'exprime en tenant compte de l'expression suivante :

$$\Delta P_{\text{totale}} = k \cdot \rho \cdot \frac{Q_s^2}{2 \cdot S^2} \quad (2.3)$$

On aura donc :

$$Q_s(t) = \sqrt{2 \cdot \frac{S^2}{k \cdot \rho}} \cdot \sqrt{P_{\text{aval filtre}} - P_{\text{aval vanne}}}$$

On considère alors :

$$K_v = \sqrt{2 \cdot \frac{S^2}{k \cdot \rho}}$$

L'expression de débit s'écrit :

$$Q_s(t) = K_v \cdot \sqrt{P_{\text{aval filtre}} - P_{\text{aval vanne}}} \quad (2.4)$$

K_v : Le coefficient d'écoulement de la vanne.

Le coefficient de perte de charge suivant le degré d'ouverture de la vanne dépend du profil hydraulique du papillon. Le tableau ci-après donne à titre indicatif quelques valeurs usuelles.

Coefficient d'écoulement "Kv" des vannes à papillon

Poids spécifique de l'eau à 20°C = 1															
Ouvert en°	Diamètre de la vanne														
	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"
	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600
25°	2.6	5.2	8.6	13	23	50	83	142	220	319	422	552	759	948	1250
30°	4.3	7.8	13	20	35	74	121	211	327	465	638	759	1052	1336	1853
40°	9.5	15.5	23	33.6	61	129	211	353	560	819	1077	1422	1896	2327	3190
50°	15,5	24	38	56	99	211	345	590	974	1353	1810	2241	3103	3879	5172
60°	22,5	47.5	73	112	198	414	677	1099	1810	2629	3448	4310	6034	7327	9914
70°	38,8	62	94.8	142	259	526	871	1478	2327	3405	4310	5431	7759	9483	13793
75°	47,5	79.3	116,4	181	336	702	1138	1858	3017	4224	5646	7586	9914	12500	17241
80°	60,4	95	142	215,5	400	845	1392	2302	3664	4129	6853	9052	11638	14655	20259
90°	69	116,4	181	267	465	948	1646	2746	4224	6336	8448	10517	14655	18534	23707

Tableau 2.1 : Tableau indicatif de la variation de K_V en fonction de l'angle d'ouverture de la vanne papillon.

Remarque :

La pression aval vanne représente la pression au niveau du déversoir en sortie. Ce dernier étant exposé à la seule et unique pression atmosphérique.

En résultera l'expression du débit suivante :

$$Q_s = K_V \cdot \sqrt{P_{\text{aval filtre}}} \quad (2.5)$$

2. Construction du modèle

On choisit pour la construction de notre modèle la structure modèle d'état composée de deux variables d'états, qui sont respectivement la hauteur en amont et la hauteur en aval du filtre.

2.1. Approche de la modélisation

On considère le filtre comme étant un ensemble, une succession de deux bacs. Le premier bac ayant comme débit entrant, celui entrant au filtre Q_e , et comme débit sortant le débit de filtration Q_f .

Le premier bac déverse ainsi vers le second avec un débit égal à Q_f . Par conséquent le débit Q_f devient le débit entrant au deuxième bac. Ce dernier aura un débit sortant égal à celui de la sortie du filtre Q_s .

Schéma équivalent

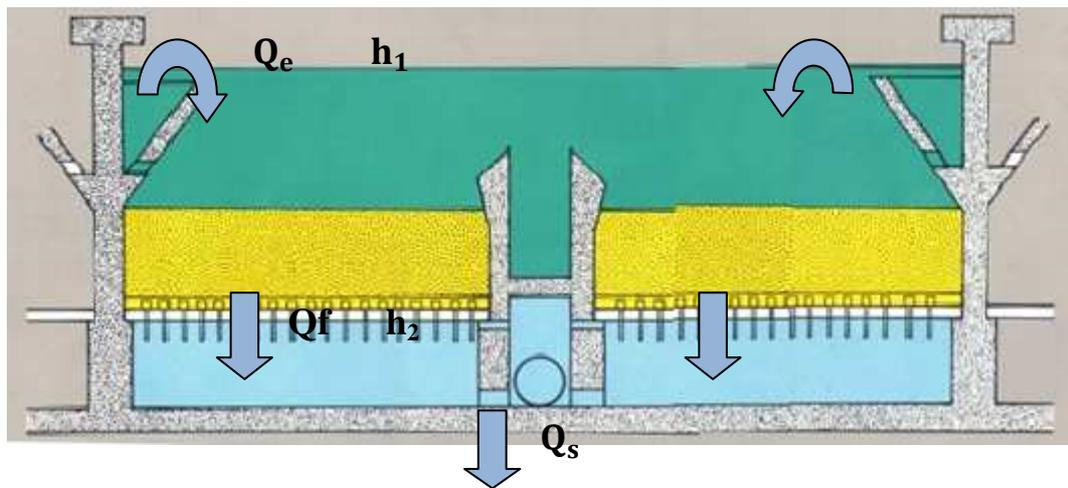


Figure 2.3 : Illustration de l'approche de la modélisation.

2.2. Notion d'état

On définit l'état d'un système à l'instant t_0 comme l'information sur le passé nécessaire et suffisante pour déterminer l'évolution ultérieure du système quand on connaît, pour $t > t_0$, les signaux d'entrée et les équations du système.

D'une manière générale, à tout système linéaire, causal et continu peuvent être associées les équations matricielles suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot e(t) \quad : \quad \text{Equation d'état} \\ y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot e(t) \quad : \quad \text{Equation de sortie} \end{array} \right.$$

Dans le cas d'un système stationnaire, les matrices A, B, C et D sont indépendantes du temps.

- A est appelée matrice d'état.
- B est appelée matrice de commande.
- C est appelée matrice de sortie.
- D est appelée matrice de transmission directe.

NB : Dans le cas monovariante, les matrices B, C, D seront des vecteurs.

2.3. Formulation des équations d'états du système

2.3.1. Equation d'état de la hauteur en amont

D'après la loi de BERNOULLI qui énonce que la variation du volume à l'intérieur d'un récipient est égal à la différence de son débit entrant et son débit sortant.

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s$$

Son application au premier bac donne la relation suivante :

$$\frac{dV_1}{dt} = Q_e - Q_f$$

Les deux bacs sont des réservoirs cubiques à section homogène et constante S. Ce qui nous ramène à avoir la relation suivante :

$$S \frac{dh_1}{dt} = Q_e - Q_f \quad (2.6)$$

D'après la loi de Darcy :

$$Q_f = K \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Identiquement égale à l'expression suivante:

$$Q_f = K \cdot \frac{S}{L} \cdot (h_1 - h_2) \quad (2.7)$$

On remplace l'équation (2) dans la l'équation (1). Ce qui nous donne l'expression suivante :

$$S \frac{dh_1}{dt} = Q_e - K \cdot \frac{S}{L} \cdot (h_1 - h_2)$$

Pour mettre en relief la variation de la première variable d'état, on divise l'égalité sur la section :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{S} Q_e - \frac{K}{L} \cdot (h_1 - h_2)$$

Le débit Q_e constant qu'on représente par une perturbation. L'équation d'état de la 1ere variable, aura pour expression :

$$\dot{x}_1 = \frac{K}{L} \cdot x_2 - \frac{K}{L} \cdot x_1 + \frac{1}{S} W \quad (2.8)$$

2.3.2. Equation d'état de la hauteur en aval

L'application de la loi de Bernoulli sur le deuxième bac nous donne la relation suivante :

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_f - Q_s$$

Le second bac ayant la même section que le premier :

$$S \frac{dh_2}{dt} = Q_f - Q_s \quad (2.9)$$

On remplace ainsi l'équation (2) dans la l'équation (4). Ce qui nous donne l'expression suivante :

$$S \frac{dh_2}{dt} = K \cdot \frac{S}{L} \cdot (h_1 - h_2) - Q_s \quad (2.10)$$

D'après les pertes de charges calculées précédemment. Nous avons:

$$Q_s = K_v \sqrt{P_{aval}}$$

Les fluides contenus dans les bacs sont soumis uniquement à la pression atmosphérique. De ce fait l'expression devient :

$$Q_s = K_v \sqrt{\rho g \cdot h_2} \quad (2.11)$$

On remplace l'équation (6) dans la l'équation (5). Ce qui nous ramène à obtenir l'expression suivante :

$$S \frac{dh_2}{dt} = K \cdot \frac{S}{L} \cdot (h_1 - h_2) - K_v \sqrt{\rho g \cdot h_2} \quad (2.12)$$

En prenant pour commande le coefficient d'écoulement K_v . L'équation d'état de la deuxième variable aura comme expression :

$$\dot{x}_2 = \frac{K}{L} \cdot x_1 - \frac{K}{L} \cdot x_2 - \frac{1}{S} \sqrt{\rho g \cdot x_2} u$$

Le modèle ainsi établi est un modèle non linéaire à paramètres variant avec K_v comme élément de commande.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{K}{L} \cdot x_2 - \frac{K}{L} \cdot x_1 + \frac{1}{S} W \\ \dot{x}_2 = \frac{K}{L} \cdot x_1 - \frac{K}{L} \cdot x_2 - \frac{1}{S} \sqrt{\rho g \cdot x_2} u \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$(2.12)$$

Après la mise sous la forme matricielle du système, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K}{L} & \frac{K}{L} \\ \frac{K}{L} & -\frac{K}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{S} \sqrt{\rho g \cdot x_2} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{1}{S} \\ 0 \end{bmatrix} W$$

2.4. Détermination de la conductivité hydraulique.

La conductivité hydraulique est un paramètre variant dépendant de plusieurs facteurs tels que la variation de la perte de charge, la turbidité de l'effluent (eau), la granulométrie du sable, ce qui rendent en effet sa modélisation d'une complexité accrue.

Ainsi, le recours à son identification est la solution la plus appropriée vu la disposition des informations requises au niveau du rack de régulation (informations en provenance des capteurs de niveau en aval et en amont du filtre).

En s'appuyant essentiellement sur la loi de Darcy, on aboutit à l'expression suivante :

$$K = \frac{L}{S \cdot \Delta h} \cdot Q_f$$

Avec :

$$\Delta h = h_{1\text{mesuré}} - h_{2\text{mesuré}}$$

S : section du support filtrant égale à 63 m².

L : épaisseur du lit filtrant (sable) égale à 1.2 m.

- **Expression de Q_f en fonction des grandeurs mesurées :**

$$Q_f = S \frac{dh_{1\text{mesuré}}}{dt} + Q_e \quad (2.13)$$

Q_e : Débit entrant du filtre égale à 0.221 m³/s.

- **Visualisation et interprétation de la courbe de conductivité hydraulique:**

Lors de l'identification, le pas d'échantillonnage entre chaque mesure prise est de 15 minutes. Dans toutes les courbes qui suivront, on a représenté 110 échantillons équivalents à un cycle de filtration.

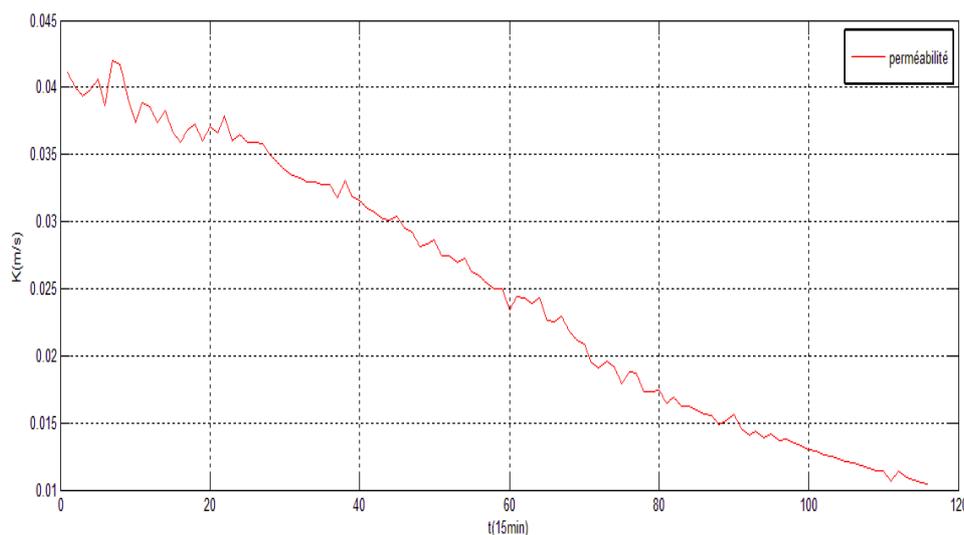


Figure 2.4 : Courbe de la perméabilité identifiée en fonction du temps.

Interprétation :

La conductivité hydraulique caractérisant les milieux poreux (sable), sa variation définit l'état du filtre.

A l'état initial, la conductivité est maximale ($K=0.0411$ m/s), ce qui indiquerait que le filtre est propre, marquant ainsi le début de filtration. Au cours de la filtration, le filtre s'encrasse tout en réduisant la conductivité hydraulique jusqu'au colmatage, où la perméabilité atteint sa valeur minimale ($K=0.0104$ m/s), marquant ainsi la fin de la filtration.

Conclusion :

La conductivité hydraulique, paramètre décisif permettant de définir la durée de fonctionnement d'un filtre, elle nous renseigne aussi sur son état et sur son comportement au cours du temps, elle affecte grandement la dynamique de système vu qu'elle se manifeste en grande partie au niveau du modèle (elle apparait dans les deux équations d'états).

2.5. Détermination de coefficient d'écoulement K_v

- **Définition**

K_v est un coefficient expérimental qui caractérise la capacité en débit de la vanne de sortie. Il correspond à la valeur pratique du débit d'eau en m^3/s , sous la pression engendrée par la hauteur en aval du filtre. Sachant que la vanne régulatrice représente l'organe de commande qui permet d'affecter d'une manière pertinente la dynamique du procédé, la régulation du procédé exige la connaissance parfaite de ce coefficient. Par ailleurs, la nécessité de comparer le modèle obtenu au procédé physique dont les mesures sont effectuées sur le système régulé, nous impose d'identifier K_v et son évolution dans le temps. La connaissance de K_v permet de déduire l'angle d'ouverture et de comprendre ainsi le rôle de l'organe de commande. Cette étape est primordiale pour la comparaison et la validation du modèle.

D'après l'équation (6), on obtient :

$$K_v = \frac{\sqrt{\rho g \cdot h_{2\text{mesuré}}}}{Q_s}$$

- **Expression de Q_s en fonction des grandeurs mesurées et Q_f identifié précédemment par la relation (8):**

$$Q_s = Q_f - S \frac{dh_{2\text{mesuré}}}{dt} \quad (2.14)$$

- **Visualisation et interprétation de la courbe de perméabilité :**

La courbe suivante montre l'évolution de coefficient K_v durant un cycle de filtration, permettant ainsi d'assurer le maintien du niveau en amont constant par le biais du régulateur analogique mis en place.

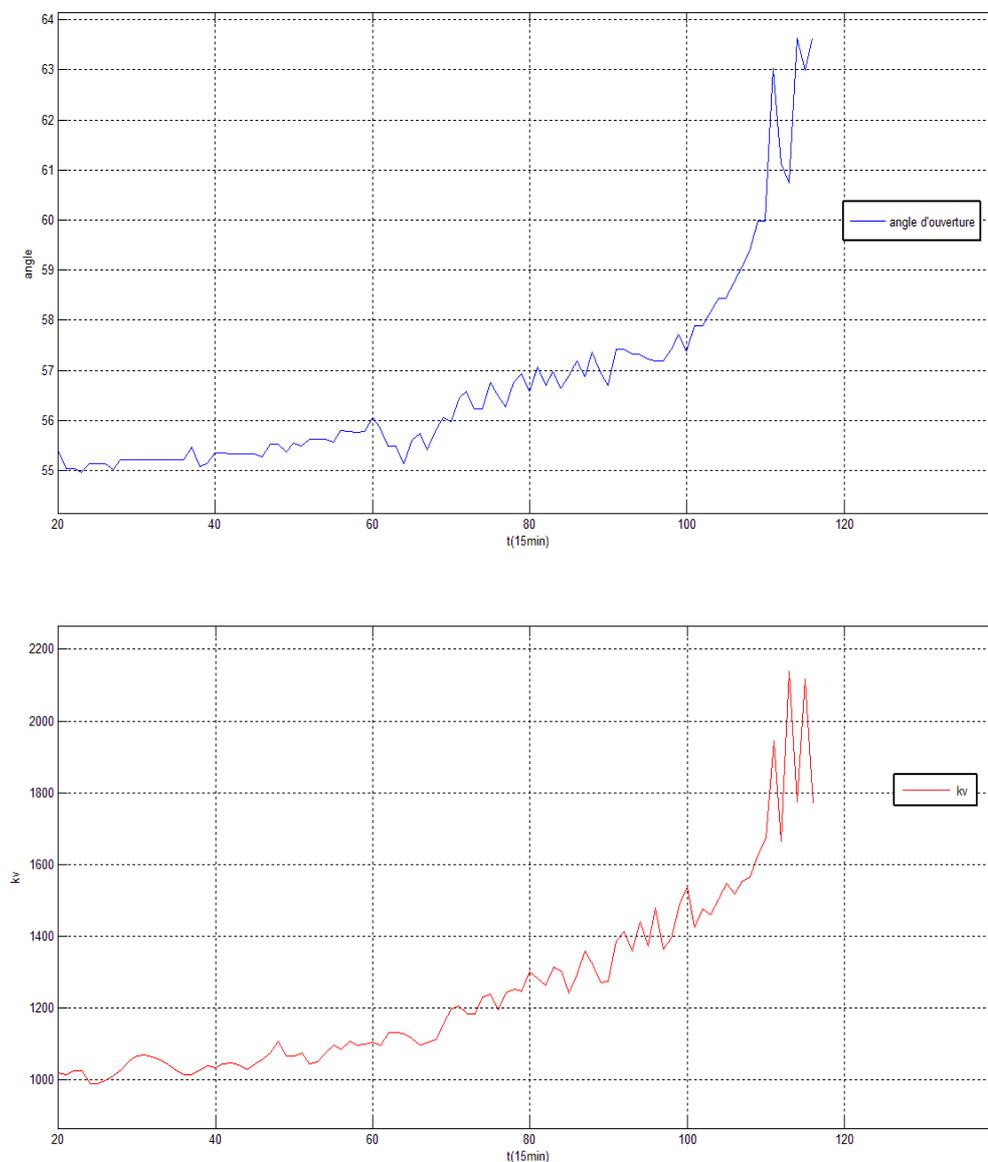


Figure 2.5 : Courbes de l'évolution de K_v et de l'angle d'ouverture α en fonction du temps.

Interprétation :

Le coefficient d'écoulement est étroitement lié à l'angle d'ouverture de la vanne, pendant un cycle de filtration la vanne tend à s'ouvrir pour évacuer le superflu d'eau qui engendrait la montée des eaux en surface du filtre. Cette ouverture est accompagnée d'une augmentation du coefficient K_v . Cette caractéristique met en évidence la relation de proportionnalité qui existe entre l'angle d'ouverture et ce dernier.

2.5.1. Interpolation du coefficient d'écoulement en fonction de l'angle d'ouverture :

Pour procéder à l'interpolation, on doit faire en sorte d'établir un meilleur compromis entre la (complexité) simplicité de l'expression résultante et sa précision pour cette dernière,

On choisit comme critères de sélection la somme des écarts quadratiques, l'écart type et la variance qui doivent être les plus restreint possible.

La complexité de l'expression finale se traduit par l'évaluation de l'ordre de la difficulté, et ce lors de l'obtention de la fonction inverse reliant l'angle d'ouverture au coefficient d'écoulement, et qui doit être directement exploitée pour exciter l'organe de commande (vanne régulatrice).

2.5.2. Interpolation polynomiale linéaire :

Etant donnée la relation de proportionnalité mise en évidence antérieurement, le choix de la méthode de l'interpolation polynomiale linéaire paraît judicieux et ce pour définir la relation existante entre l'angle d'ouverture et le coefficient d'écoulement ; cette méthode présente comme avantage principale la simplicité de l'obtention de la fonction inverse.

En utilisant l'utilitaire cftool (curve fitting tool) de Matlab, on obtient l'expression suivante :

$$K_v(t) = 117.8 * \alpha(t) - 5465 \quad (2.15)$$

Avec :

α : Angle d'ouverture de la vanne régulatrice.

K_v : Coefficient d'écoulement propre à la vanne.

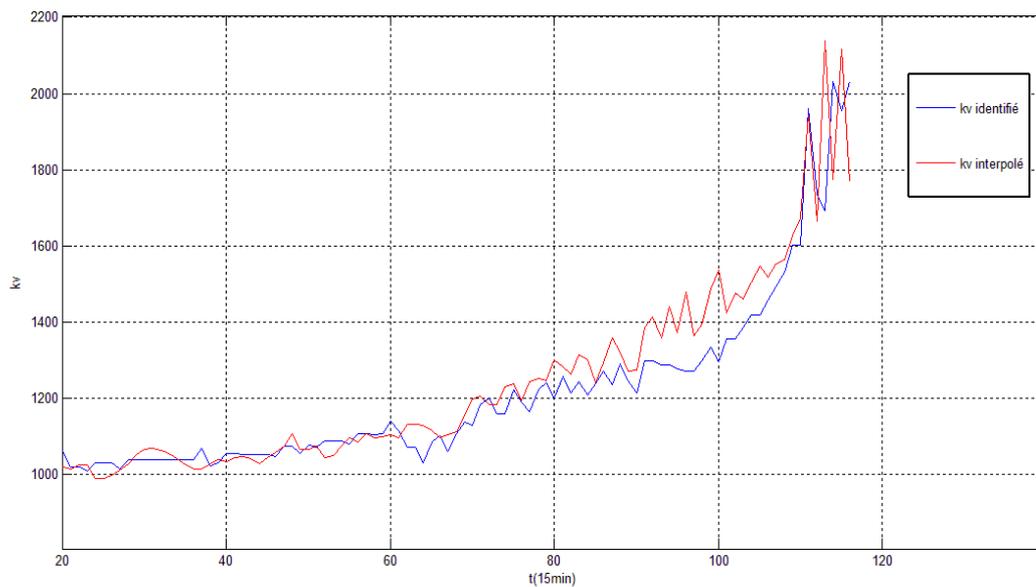


Figure 2.6 : Courbe de l'évolution de coefficient K_v interpolé comparée à celle de K_v réel.

Interprétation :

La fonction issue de l'interpolation linéaire de K_v définit suffisamment l'évolution de ce coefficient au cours du temps.

Pour des contraintes de complexité de l'obtention de la fonction inverse, on a opté dans notre étude pour la méthode de l'interpolation polynomiale linéaire, malgré que le cumul de l'écart quadratique est égal à $5.0395 \cdot 10^{+3}$ paraît assez élevé et aussi la variance qui est de $0.45924 \cdot 10^{+3}$. Ces derniers sont dus en grande partie à l'ordre de la grandeur K_v .

Expression de la fonction inverse :

$$\alpha(t) = 0.0084 * K_v(t) + 43.932 \quad (2.16)$$

3. Simulation et analyse du comportement du modèle non linéaire

3.1. Introduction

La simulation est l'imitation du comportement d'un procédé ou d'un système réel au cours du temps. Elle consiste à reproduire par calcul le comportement du procédé en utilisant le modèle mathématique. La simulation nous permet aussi de :

- Analyser le comportement du système sans risque d'endommager le procédé et ce pour différentes conditions de travail.
- Prédire un comportement futur.

- Calcul et simulation des systèmes commandés.
- Faire toutes les expériences sur les systèmes (expériences virtuelles).
- Aider à la Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

3.2. Modèle sous Simulink

3.2.1. Représentation du modèle

Pour la représentation du modèle, on a choisit l'environnement Simulink, adapté pour la simulation et l'étude du comportement de modèles obtenus à base d'équations physiques.

Ainsi le synoptique décrivant le modèle obtenu du filtre est représenté dans la page suivante :

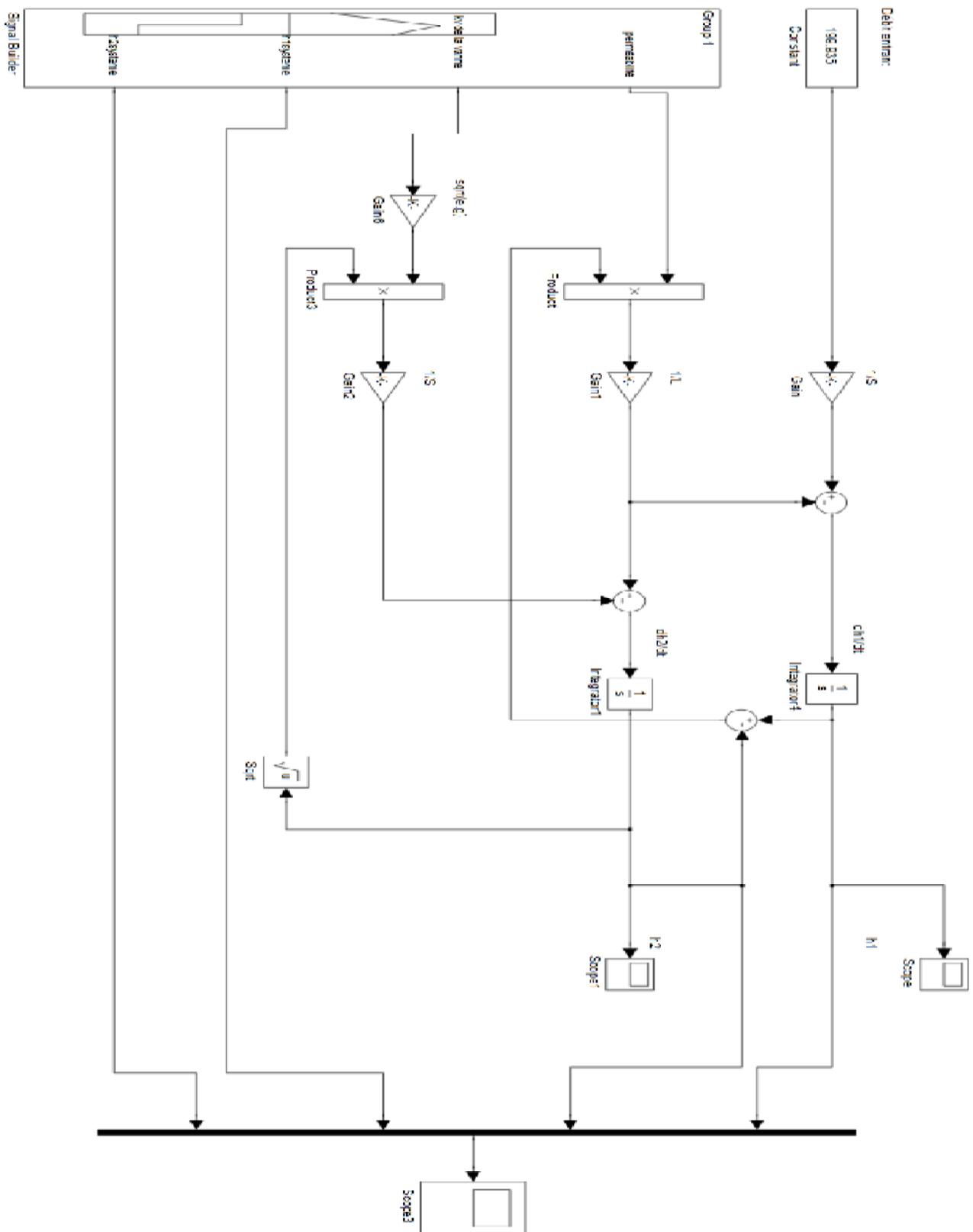


Figure 2.7 : Synoptique du modèle sous simulink.

Dans ce modèle, on a représenté la perturbation agissante sur le système par une constante égale au débit entrant Q_e du filtre.

À l'instar du coefficient d'écoulement propre à la vanne, la perméabilité est introduite à l'aide du bloc fonctionnel « **SIGNAL BUILDER** » après avoir été identifiée précédemment en exploitant les mesures en disposition.

A posteriori, l'insertion des mesures de la hauteur en amont, et en aval du filtre, nous permet de comparer les deux variables d'états aux mesures obtenues, et ainsi de définir la fidélité et la crédibilité du modèle par rapport au système réel.

Visualisation et interprétation des courbes :

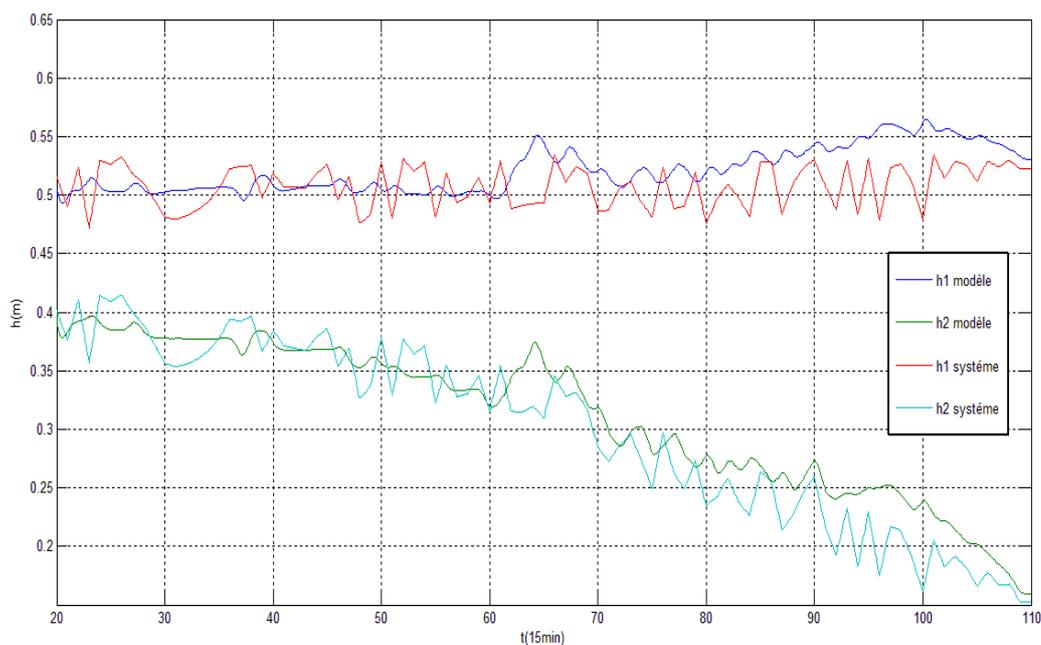


Figure 2.8 : Courbe de l'évolution des variables d'état du modèle comparée à celle des variables d'états du système réel.

3.2.2. Interprétation et validation du modèle

D'après la figure (2.7), les réponses obtenues par simulation du modèle correspondent aux réponses relevées expérimentalement sur le système réel. Ces résultats confirment la validation du modèle. L'erreur relative moyenne est de 3.4709 % pour h1, et une somme des écarts quadratiques atteignant 0.0431 au bout de 110 échantillons pour h1, et de 1.2895 pour h2. Et une variance de $0.31340 \cdot 10^{-3}$ pour h1, et de 0.0036 pour h2.

On peut donc tolérer facilement les incertitudes obtenues précédemment, vu leurs ordre assez restreint, en particulier ceux de la sortie considérée h_1 , exprimant ainsi la cohérence et la concordance du modèle avec le procédé réel, nous conduisant enfin à valider le modèle résultant.

4. Conclusion

Le modèle obtenu décrit instantanément et rigoureusement le procédé de filtration. Par conséquent, différents domaines sont envisageables pour son exploitation.

On pourra à l'aide de ce modèle :

- voir l'apport de l'étendu du support de filtration et son effet avec exactitude sur la rentabilité du filtre (volume d'eau filtrée par cycle), ainsi on pourra dimensionner et concevoir un filtre ou une filière (plusieurs filtres) selon le volume journalier désiré (avantage de la simulation) avec précision, et ce en respectant toujours les contraintes liées à l'encombrement.
- Etendre et approfondir les études portant sur le processus de filtration et comprendre parfaitement les phénomènes qu'il régit (engendre).
- Contribuer à l'élaboration d'un modèle empirique portant sur les milieux granulaires et tirer une relation pertinente liant la granulométrie à la perméabilité du sable.
- Avoir une meilleure compréhension du phénomène de colmatage conduisant donc à une meilleure conception sur le plan dimensionnement et configuration des éléments.
- Synthétiser un correcteur à base de la régulation PID toute en optimisant les constantes (paramètres) d'intégration, de la dérivée et de proportionnalité (gain K_p).
- Assurer un passage vers le domaine fréquentiel pour une meilleure maîtrise et de meilleures performances lors de la régulation (robustesse, marge de gain, marge de phase, ..., etc.).
- Un des grands atouts de ce modèle est la construction d'un capteur logiciel permettant de déterminer en ligne le débit sortant du filtre (relation (9)). En intégrant cette grandeur, nous aboutissons au volume ce qui permettra de nous informer d'une manière précise sur la rentabilité du filtre avec la possibilité d'ajouter comme critère d'arrêt de filtration un volume désiré.

Chapitre 3

Synthèse d'une loi de commande basée sur le modèle établi

Introduction

La complexité croissante des systèmes à commander s'accompagne d'une complexité croissante des systèmes de commande. Sur ce point la technologie numérique est de grand secours puisqu'elle offre, outre des moyens de calcul considérables, la possibilité de simuler avant d'implémenter sur le système physique, et tout ceci pour des coûts très bas. En comparaison avec les systèmes de commande analogiques, la synthèse d'un correcteur numérique est facilitée et les systèmes conçus vont pouvoir devenir plus performants du fait de la possibilité de faire communiquer aisément différents systèmes numériques, de pouvoir intégrer des systèmes de commande hiérarchiques, déterministes ou stochastiques...

Dans ce chapitre, on se propose de synthétiser une loi de commande basée sur le modèle établi. Pour ce faire, on procède tout d'abord à la linéarisation du modèle obtenu, ensuite le passage à la forme normale nous permettra l'obtention d'une forme compagne commandable. Enfin l'application d'une commande qui rejettera la perturbation assurera d'une manière fiable et efficace la régulation du procédé.

Dans ce chapitre nous avons utilisé les références bibliographiques suivantes : [06], [07], [08].

1. Objectif de la commande

L'objectif principal de la commande est de maintenir la hauteur en amont du filtre constante et cela malgré la présence permanente du débit entrant Q_e durant le cycle de filtration ainsi ce dernier étant considéré comme paramètre exogène au système (perturbation) doit être rejeté.

En effet, la fonction de régulation est réalisée tout en ajustant la position de la vanne de sortie, considérée comme organe de commande, celle-ci est assujettie par une loi de commande synthétisée à base du modèle obtenu précédemment.

1. Système de commande existant

2.1. Généralités :

Le régulateur de niveau du filtre DEGREMONT est un régulateur analogique destiné à maintenir le niveau d'eau en amont du sable constant ; sans régulateur, ce niveau est essentiellement variable en fonction du colmatage et des modifications de débit du filtre.

Le rôle de la régulation est donc de créer à l'aide d'une vanne papillon, une perte de charge auxiliaire qui est grande lorsque le filtre est propre ou lorsque le débit d'entrée augmente.

La perte de charge globale du système filtre-vanne est maintenue constante par la régulation.

Une variation de perte de charge dans le filtre est compensée par une variation de perte de charge contraire, dans la vanne.

Lorsqu'il s'agit de réguler plusieurs filtres (tel est notre cas), il est impérativement indispensable que le filtre soit hydrauliquement indépendant c'est-à-dire que leur alimentation se fasse par un déversoir.

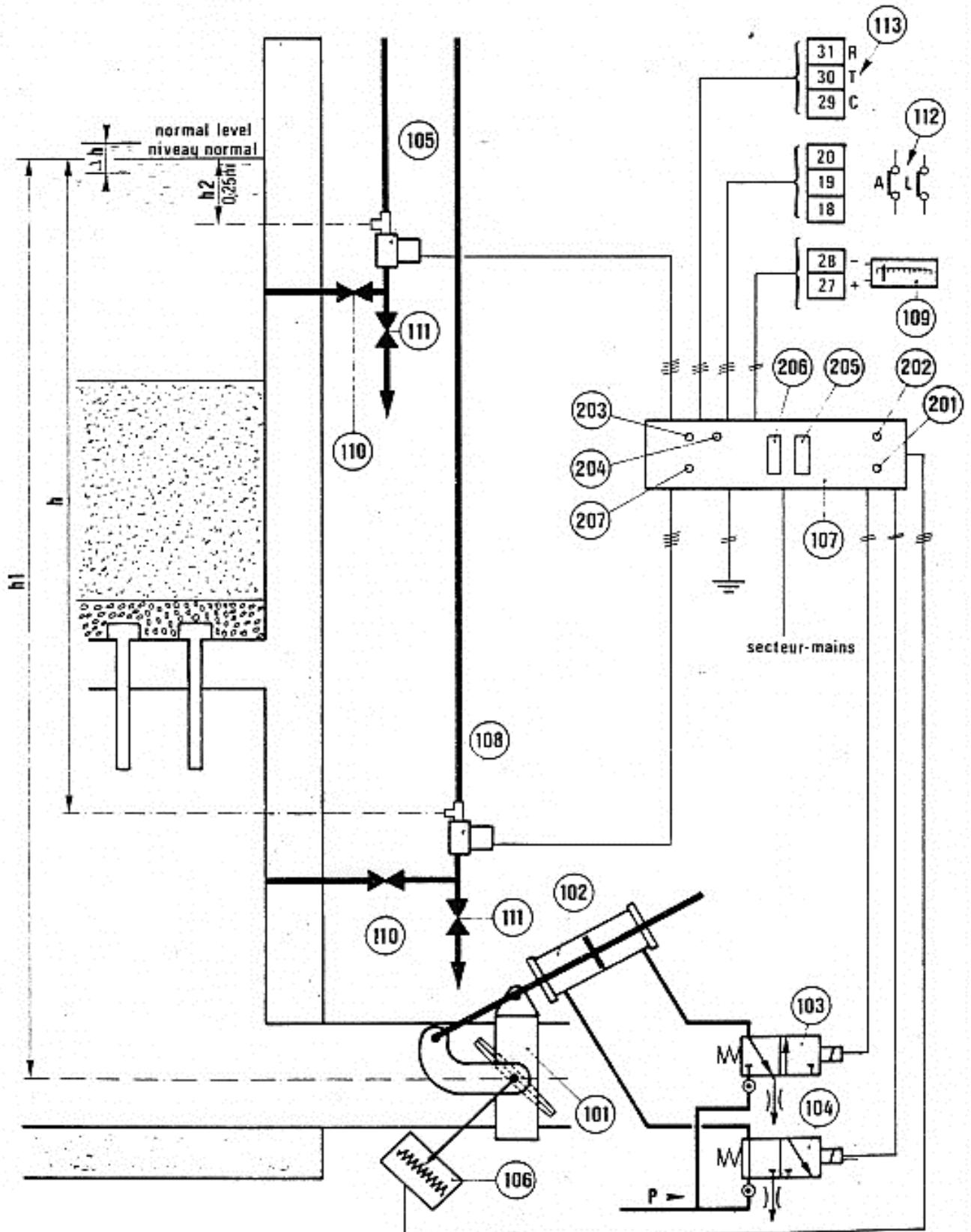


Figure 3.1 : Schéma globale du filtre muni de son actionneur.

- 101 : vanne de régulation**
- 102 : vérin double effet avec deux tiges**
- 103 : électrovanne EV1**
- 104 : électrovanne EV2**
- 105 : capteur de pression -type de type RN (mesurant la hauteur h1)**
- 106 : positionneur (recopie la position de la vanne)**
- 107 : rack de régulation**
- 108 : capteur de pression -type IC (mesurant la hauteur h2)**
- 109 : indicateur a distance**
- 110 : vanne d'isolement des capteurs**
- 111 : vanne de vidange des capteurs**
- 112 : contacts extérieurs de télécommande**
 - (L)- arrêt de filtration**
 - (A)- arrêt de filtration + démarrage lent**
- 113 : contact inverseur « alarme colmatage »**
- 201 : interrupteur « mise sous tension »**
- 202 : voyant « mise sous tension »**
- 203 : signalisation «ouverture »**
- 204 : signalisation « fermeture »**
- 205 : indicateur de niveau**
 - 207: indicateur de colmatage**
- 207 : signalisation « alarme »**

2.2. Description matérielle de processus

Le procédé de régulation comprend essentiellement les éléments suivant :

Un organe asservi :

Il est constitué d'une vanne papillon de régulation actionnée par un vérin double effet, double tige .ce vérin est commandé par deux électrovannes alimenté en air (pression de fonctionnement 2 à 3 bars).

Un organe de mesure :

Un capteur de pression de type RN mesure le niveau en amont h1. Il délivre un signal 0-10 mA pour une hauteur de colonne d'eau de 0-50cm.

Un positionneur :

Il est constitué d'un potentiomètre linéaire lié à l'axe de la vanne par un accouplement. Le potentiomètre est monté dans un boîtier étanche en PVC, il fournit un signal proportionnel à l'angle d'ouverture de la vanne.

2.3. Rack électronique de régulation :

- **Alimentation du rack**

En version standard l'alimentation du rack se fait en 220 V. alternatif de fréquence égale à 50 Hz.

- **Fonctionnement**

Le schéma fonctionnel suivant symbolise les principaux éléments qui entrent en jeu dans le fonctionnement du processus

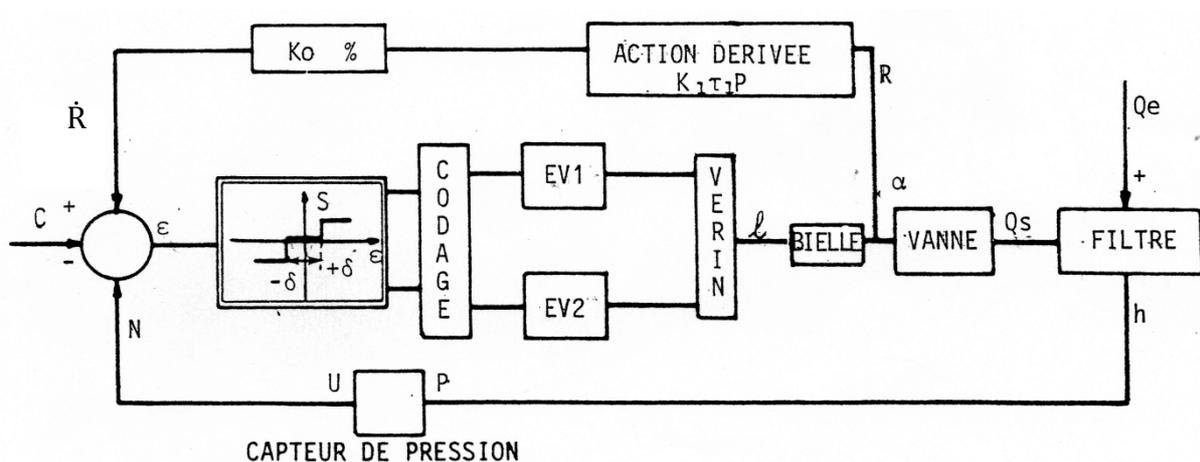


Figure 3.2 : Schéma de la boucle de régulation (régulateur analogique).

N : mesure de niveau d'eau sur le filtre

Elle est donnée par le capteur de la hauteur en amont h_1 .

C : consigne de niveau d'eau auquel on désire que le filtre se stabilise .elle est réglable par un potentiomètre situé a l'intérieur du rack.

R : position de la vanne

Elle est donnée par le positionneur solidaire à l'axe de la vanne.

La régulation compare ces trois informations et élaboré un signal d'erreur ϵ .

$$\epsilon = C + \dot{R} - N$$

\dot{R} : est la valeur de la réaction. Elle représente la dérivée du signal R du positionneur, c'est-à-dire qu'elle tendra vers 0 en fonction de temps. (Au fur à mesure que le temps s'écoule)

K1 : gain d'action dérivée.

τ_1 : Constante de temps.

Q_e : débit d'entrée dans le filtre.

Q_s : débit de sortie du filtre.

l : position de vérin.

α : angle d'ouverture.

K_0 : taux de réaction.

En conséquence la réaction sert uniquement dans le régime transitoire,

En régime établi (permanent), la consigne c est égale a n puisque $\dot{R} = 0$.

Dans la pratique pour ne pas solliciter les électrovannes à cause des fluctuations de niveau, dues au vent par exemple, le régulateur dispose d'un seuil $\pm \delta$.

Le régulateur donne trois ordres différents à la vanne en fonction de

$$\varepsilon = C + \dot{R} - N$$

- **Fonction codage des électrovannes :**

Un montage original a été réalisé pour la commande des électrovannes afin que ,lors d'une coupure de tension , la vanne de filtration se ferme .

Le régulateur commande les électrovannes EV1 et EV2 avec le code suivant :

1 = sous tension

0=hors tension

Etat de la vanne	EV1	EV2	Lampe ouverture	Lampe fermeture
En ouverture	1	1	1	0
En équilibre	1	0	0	0
En fermeture	0	0	0	1

Tableau 3.1 : Illustration de la fonction codage.

Les électrovannes sont représentées hors tension sur le schéma du raccordement pneumatique ci-dessous ; leurs fonctions correspondent au cas standard ci-dessous :

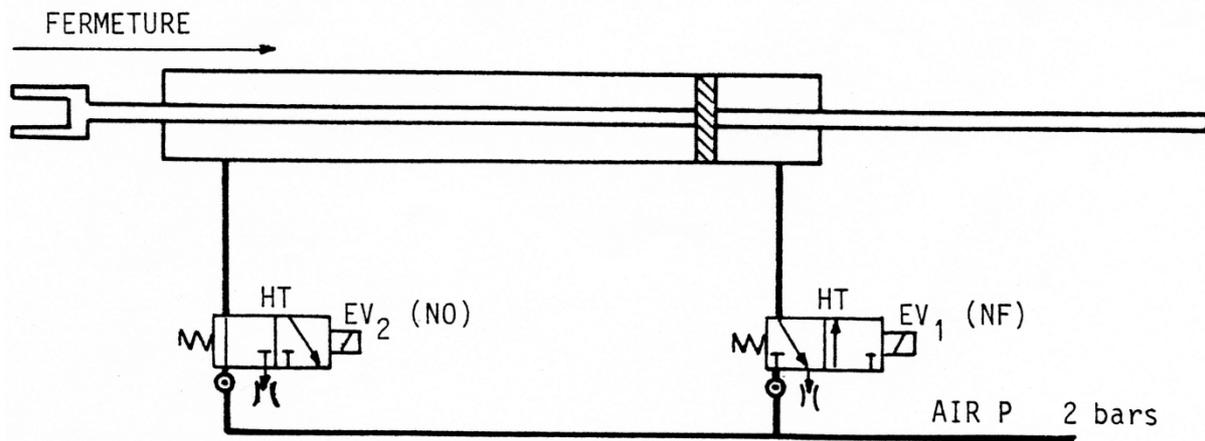


Figure 3.3 : Schéma de représentation du cas standard de l'actionneur.

A partir du schéma de la figure (3.1), on déduit que Le régulateur existant est un régulateur analogique à base d'une régulation en cascade avec action dérivée, cette dernière s'applique au niveau du positionneur dans la boucle interne, ainsi on obtient ce schéma équivalent du système régulé :

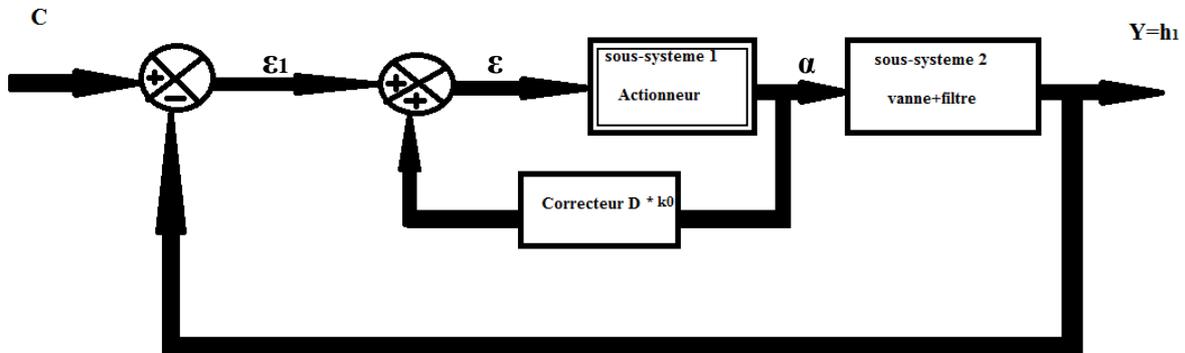


Figure 3.4 : Schéma équivalent de la boucle de régulation (régulateur analogique).

La fonction de transfert du correcteur D est donc :

$$C(s) = T_d \cdot s$$

Par identification on déduit que :

$$T_d = K1 \cdot \tau1$$

Et pour plus de commodité (causalité et réalisabilité), on écrit :

$$C(s) = T_d \cdot \frac{s}{1 + \frac{n}{T_d} \cdot s}$$

Pour y remédier à l'avance de phase engendrée par l'action dérivée, cette dernière est appliquée sur la copie position issue du positionneur lié à l'axe de la vanne. Cette configuration permet de générer un retard de phase qui compensera cette avance.

La non linéarité insérée en amont de l'écart est un relais avec zone morte exprimant ainsi une plage de tolérance autour de la consigne, vu que l'action dérivée est une action très énergétique (brusque), on évitera donc de solliciter les électrovannes y compris (l'organe asservi) d'une manière fréquente et puissante, et cela pour des fluctuations moins importantes voir négligeable du niveau d'eau qui sont dus généralement au vent.

2.4. Limites et inconvénient

- Ce type de régulation est limité vis-à-vis de sa flexibilité (commande analogique) réajustement des constantes de proportionnalité et dérivée limitée par le concepteur (potentiomètre à réglage manuel et limité).
- L'existence quasi-permanente d'oscillations (dépassements autour de la consigne) due à l'action dérivée ; qui est une action trop énergétique inadéquate (inadaptée) pour ce genre de problèmes (régulation).
- L'usure rapide des actionneurs (vérins, électrovannes,...etc.) engendré par les à-coups que produit la correction par l'action dérivée.
- Le manque de précision, vu l'insertion d'une zone morte au niveau de l'actionneur afin de le protéger des à-coups consécutifs.
- Conception du régulateur et Réajustement de ces paramètres s'effectue d'une manière empirique (difficultés de trouver les paramètres optimums).

3. Application d'une commande à base du modèle établi :

3.1. Linéarisation du modèle obtenu

L'utilisation des lois de la physique qui régissent ou décrivent le comportement d'un système ont l'inconvénient de présenter une non linéarité.

Rappelons qu'un fonctionnement est non linéaire lorsque la multiplication de l'entrée par une constante arbitraire ne conduit pas à une évolution de la sortie dans la même proportion et qu'une fonction $f(x)$ est linéaire lorsqu'elle s'écrit $f(x) = Ax$, où A est une matrice constante. Bien que l'existence d'une racine carrée dans la seconde équation d'état compromet effectivement et clairement cette caractéristique. Des méthodes de linéarisation de ces systèmes ont été développées pour permettre de y parer à ce genre d'anomalies.

Rappelons l'expression du modèle sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K}{L} & \frac{K}{L} \\ \frac{K}{L} & -\frac{K}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{S}\sqrt{\rho g \cdot x_2} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{1}{S} \\ 0 \end{bmatrix} W$$

Pour linéariser le modèle. On considère l'expression de la nouvelle commande qui consiste à l'intégration de la non linéarité dans la commande.

On considère la nouvelle commande U tel que :

$$U = b(x) \cdot u$$

Avec :

$$u = K_v$$

$$b(x) = -\frac{1}{S}\sqrt{\rho g \cdot x_2}$$

Ce qui en résulte le modèle linéarisé suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = -\frac{K}{L} \cdot x_1 + \frac{K}{L} \cdot x_2 + \frac{1}{S} W \\ \dot{x}_2 = \frac{K}{L} \cdot x_1 - \frac{K}{L} \cdot x_2 + U \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_2 = \frac{K}{L} \cdot x_1 - \frac{K}{L} \cdot x_2 + U \end{array} \right. \quad (3.2)$$

On obtient donc la forme d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K}{L} & \frac{K}{L} \\ \frac{K}{L} & -\frac{K}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} \frac{1}{S} \\ 0 \end{bmatrix} W$$

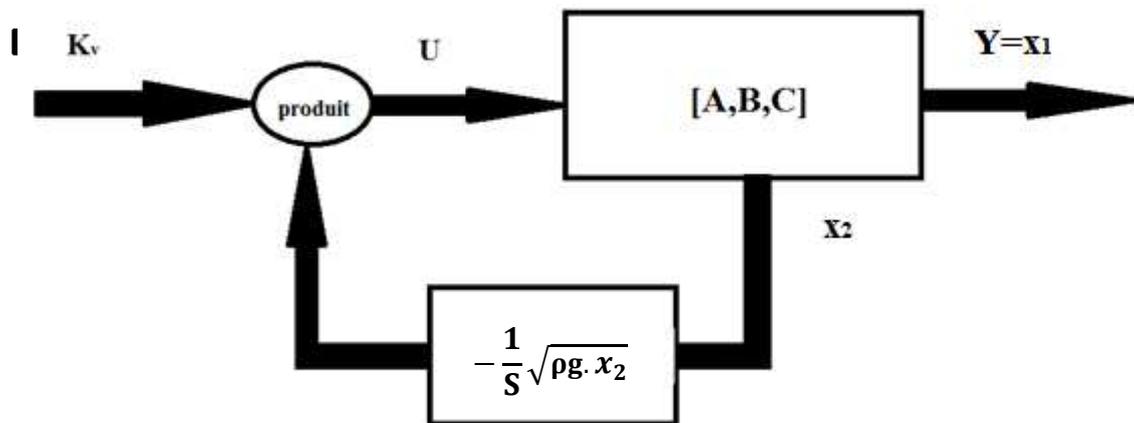


Figure 3.5: Schéma illustrant la linéarisation du modèle.

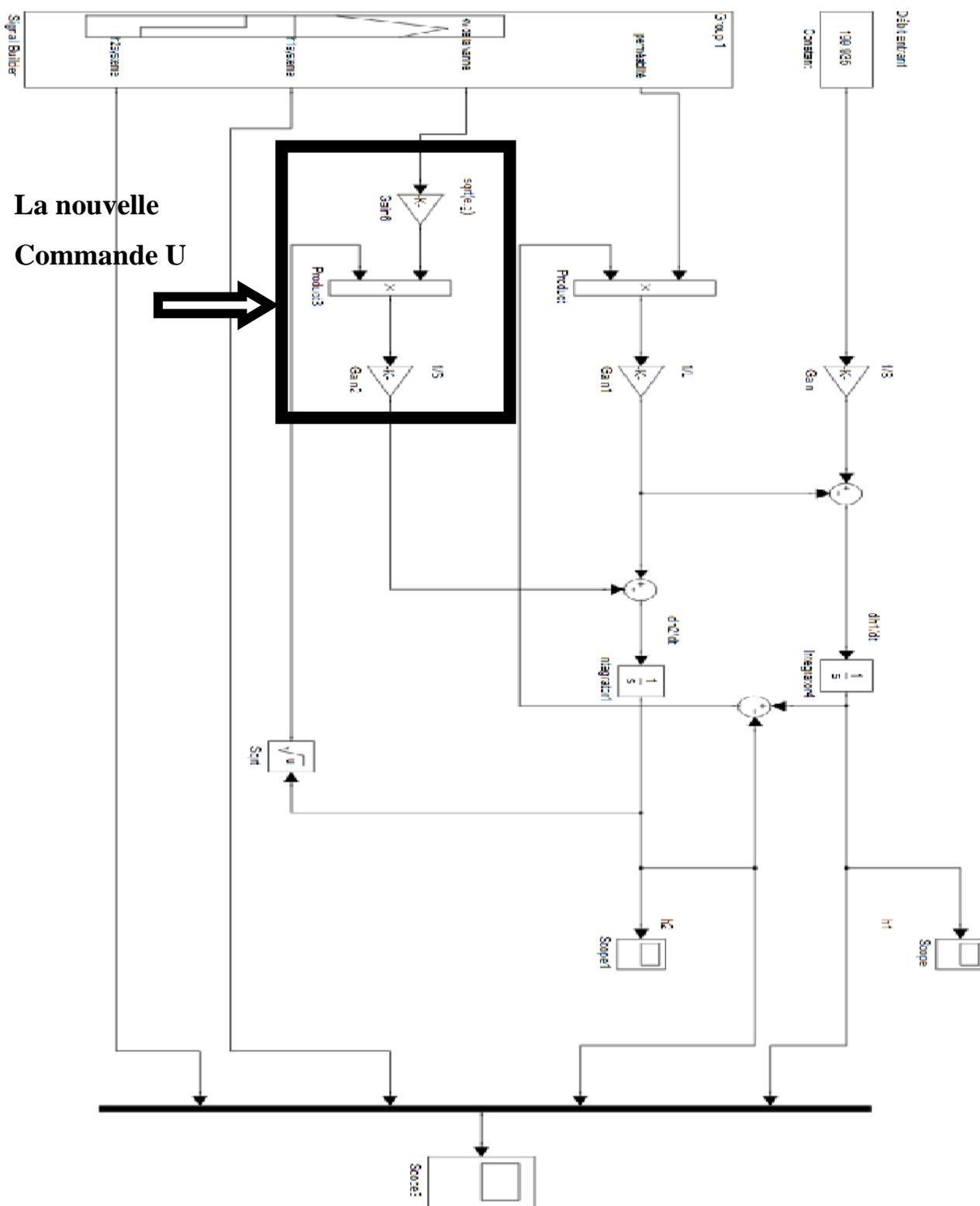


Figure 3.6 : Schéma de la linéarisation sous simulink

3.2. Forme normale

Pour espérer appliquer une commande qui rejette la perturbation et par la suite, appliquer un retour d'état imposant une certaine dynamique, il faut tout d'abord obtenir la forme compagne commandable. L'obtention de cette dernière exige le passage vers une nouvelle base (changement de base après linéarisation du système).

Obtention de la forme normale :

Le modèle linéarisé ainsi obtenu est :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{K}{L} \cdot x_2 - \frac{K}{L} \cdot x_1 + \frac{1}{S} W & (3.1) \\ \dot{x}_2 = \frac{K}{L} \cdot x_1 - \frac{K}{L} \cdot x_2 + U & (3.2) \end{cases}$$

Avec :

$$y = x_1$$

On pose :

$$\begin{cases} z_1 = y = c \cdot x = x_1 \\ z_2 = \dot{z}_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{x}_1 & (3.3) \\ \dot{z}_2 = \left(\frac{LK - K^2}{L^2} \right) \cdot x_2 + \left(\frac{K^2 - LK}{L^2} \right) \cdot z_1 - \frac{K}{L} \cdot z_2 + \frac{K}{L} \cdot U & (3.4) \end{cases}$$

L'expression de x_2 en fonction de (z_1, z_2, w) est donnée par la relation suivante :

$$x_2 = z_1 + \frac{L}{K} \cdot z_2 - \frac{L}{K \cdot S} \cdot W \quad (3.5)$$

On remplace donc l'équation (4) dans l'équation(3), on obtient :

$$\dot{z}_2 = \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{2 \cdot K}{L}\right) \cdot z_2 + \frac{K}{L} \cdot U - \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{K}{L}\right) \cdot W \quad (3.6)$$

La forme normale obtenue est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{2 \cdot K}{L}\right) \cdot z_2 + \frac{K}{L} \cdot U - \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{K}{L}\right) \cdot W \end{cases} \quad (3.3)$$

$$(3.6)$$

Sous la forme matricielle, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{\dot{K}}{K} - \frac{2 \cdot K}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{L} \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{K}{L}\right) \end{bmatrix} W$$

Avec:

$$U = b(z) \cdot K_v$$

$$b(z) = -\frac{1}{S} \sqrt{z_1 + \frac{L}{K} \cdot z_2 - \frac{L}{S \cdot K} \cdot W} \quad (3.7)$$

Visualisation et interprétation des courbes obtenues :

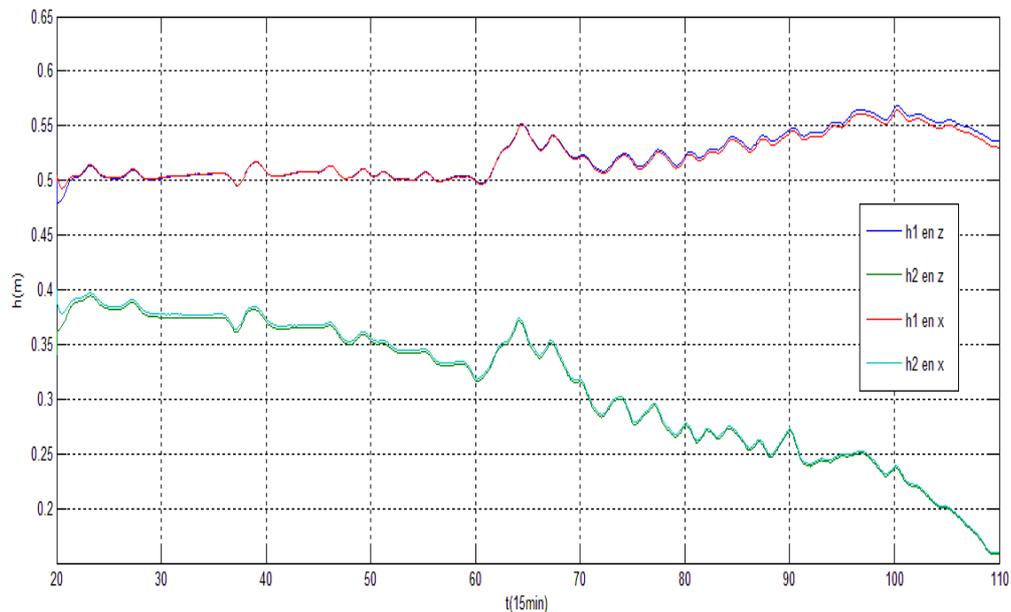


Figure 3.8 : Courbes de l'évolution des hauteurs dans la nouvelle base comparée à celle des hauteurs dans l'ancienne base.

Interprétation :

la somme des écarts quadratiques engendrés par le changement de base qui atteindra 0.0153 pour h1 et 0.0280 pour h2 et ce par rapport aux grandeurs du système dans l'ancienne base, est due essentiellement à l'utilisation de l'approximation d'Euler pour l'obtention de la dérivée de la perméabilité qui engendre une perte de précision mais négligeable et elle sera négligée d'avantage car la disponibilité des informations (mesures) sera d'une manière continue (capteur analogique) et leurs traitement sera d'une manière instantanée avec un temps de calcul réduit (traitement de données s'effectuera en temps réel) et vu aussi l'inertie (grande) du système environ 4 jours, ce qui nous incitera d'avantage à considérer le système continu.

Lors de l'implémentation l'arrivée de flux d'information et son traitement sera d'une manière instantanée ainsi l'approximation d'Euler tend à devenir plus précise ce qui diminuera énormément l'écart engendré par le changement de base.

3.3. Rejet de perturbation

Pour rejeter la perturbation, il suffit d'anticiper son effet au niveau de la commande vu que son expression est connue, il faut donc formuler l'expression de la commande de telle sorte qu'elle soit compensée. Le système sera donc laissé à lui-même (régime libre) après compensation.

Ainsi, on obtient la nouvelle expression de la commande qui est complémentaire à celle de la perturbation pour garantir l'effet de la compensation.

3.3.1. Application d'une commande pour le rejet de perturbation

On pose la nouvelle commande suivante :

$$\frac{K}{L} \cdot U = +\frac{1}{S} \cdot \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{K}{L} \right) \cdot w \quad (3.8)$$

En cas de perturbation variable (débit entrant variable), on aura comme expression de commande :

$$\frac{K}{L} \cdot U = \frac{1}{S} \left(\left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{K}{L} \right) \cdot w - \dot{w} \right) \quad (3.9)$$

Alors on remplace l'équation (8) dans (6), on obtient la relation suivante :

$$\dot{z}_2 = \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{2 \cdot K}{L} \right) \cdot z_2$$

Ce qui en résulte le modèle avec les équations d'états suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \left(\frac{\dot{K}}{K} - \frac{2 \cdot K}{L} \right) \cdot z_2 \end{array} \right.$$

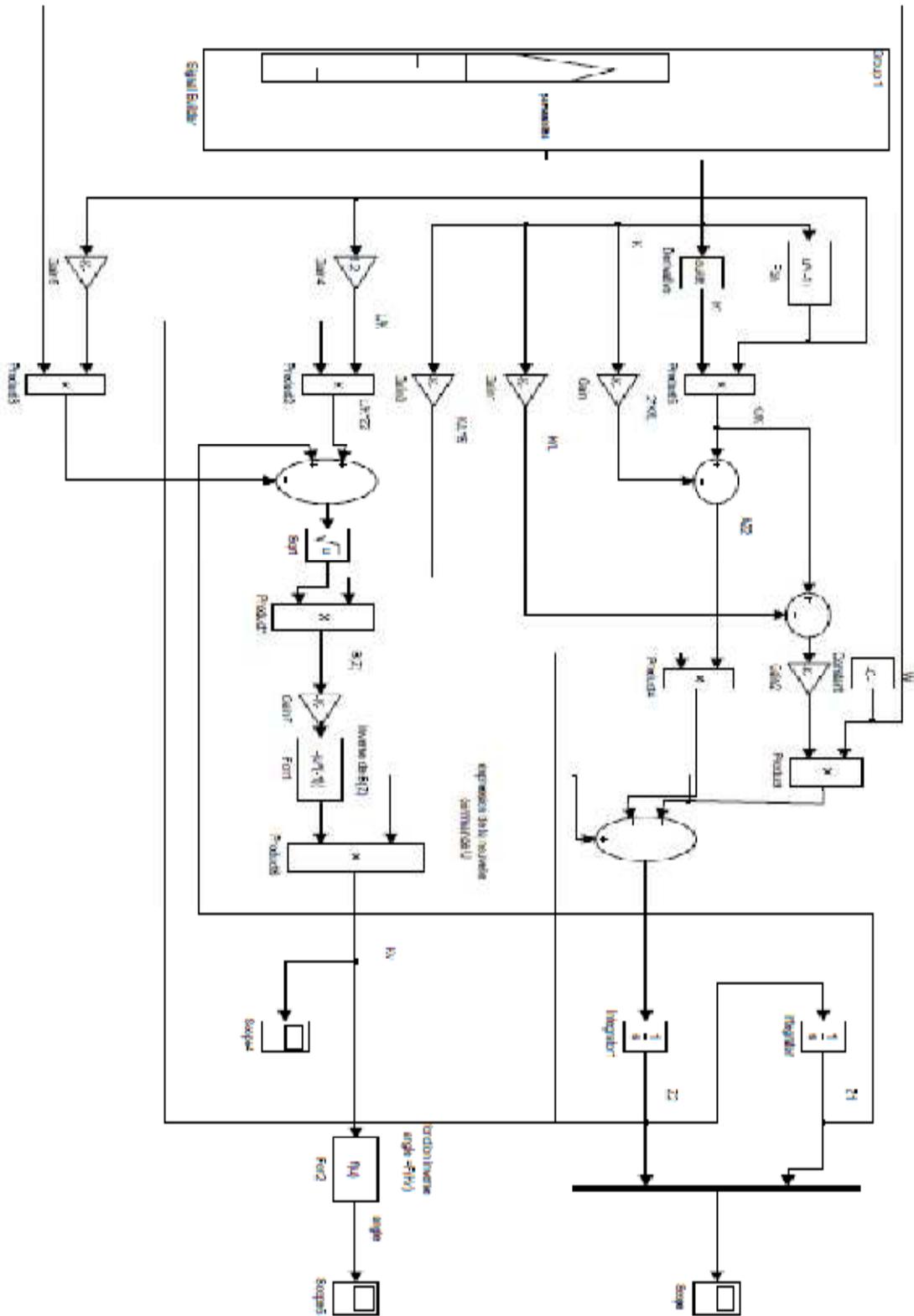


Figure 3.9 : Schéma de l'application du rejet de perturbation sous Simulink.

Visualisation des courbes :

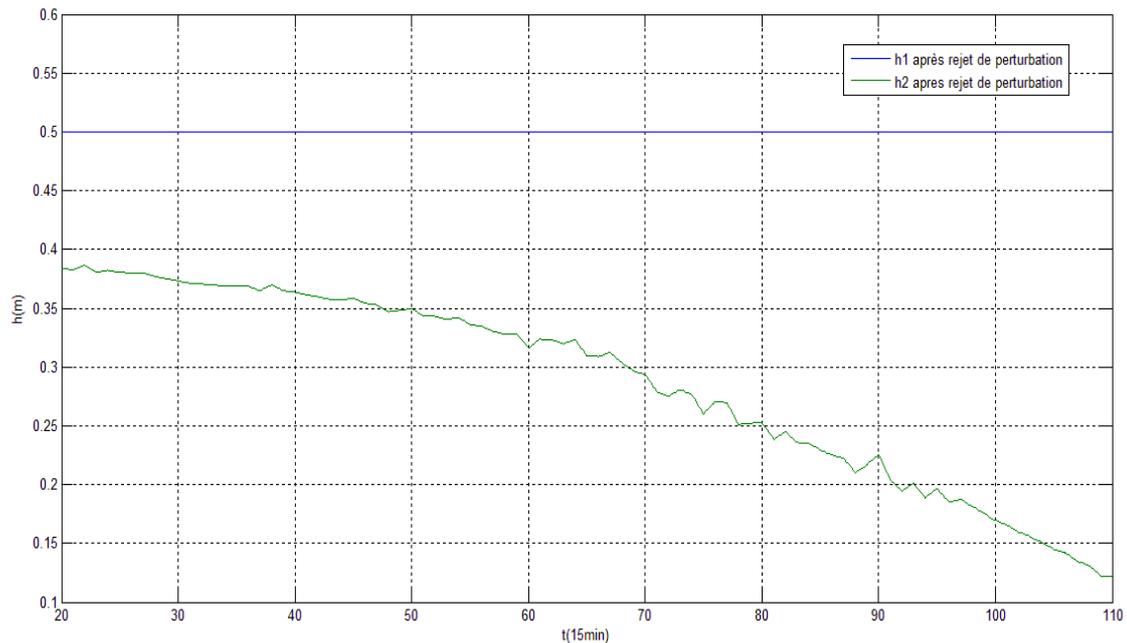


Figure 3.10 : Courbe de la variation des hauteurs après rejet de perturbation.

Interprétation :

Le rejet de perturbation a pour effet d'annuler le régime forcé, et de laisser le système en régime libre avec la condition initiale.

Comparaison avec la régulation existante :

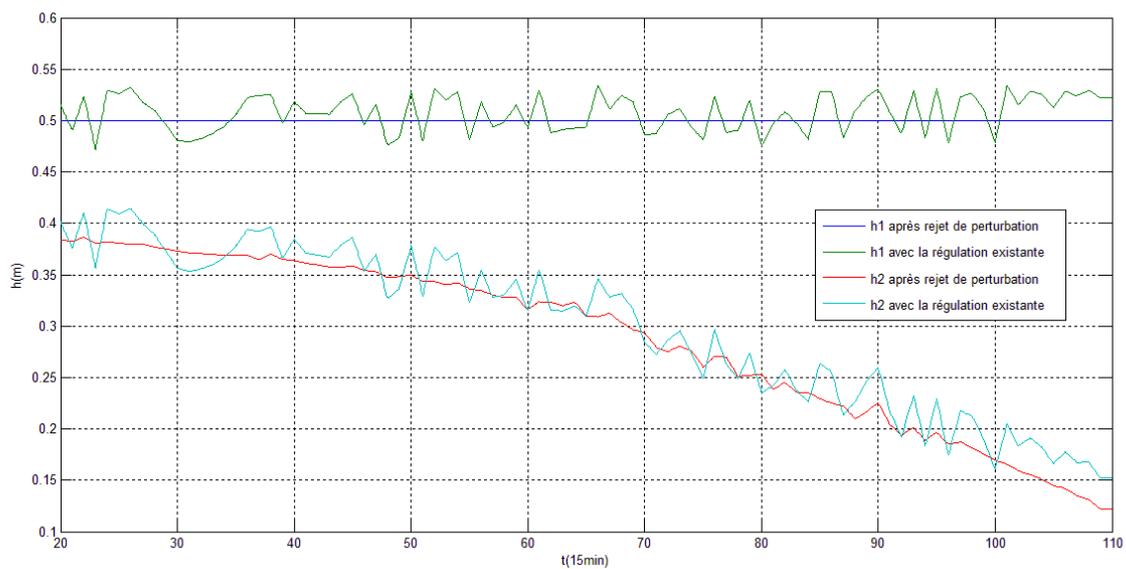


Figure 3.11 : Courbe de l'évolution des hauteurs après rejet de perturbation comparée a celle des hauteurs de la régulation existante.

Interprétation :

Visiblement, le rejet de perturbation améliore énormément la qualité du signal de sortie en ayant une somme des écarts quadratiques égale à $4.8606 \cdot 10^{-6}$, et une erreur relative moyenne égale à 0.0412 %, un résultat très satisfaisant et amélioration remarquable ainsi on se contentera de ce rejet de perturbation pour assurer la poursuite et la régulation, vu qu'imposer une éventuelle dynamique par retour d'état à ce système risque de déstabiliser le système et de ne pas apporter une amélioration sensible (prévisible) et aussi risque de compliquer d'avantage l'expression de la commande qui a d'ores et déjà subi trois changements consécutives et qui sont respectivement :

Linéarisation, un changement de base et enfin le rejet de perturbation.

3.3.2. Obtention de l'angle d'ouverture de la vanne

Après application du rejet de perturbation qui consistait à remplacer l'expression de la commande par le complément de la perturbation agissante sur le système, on doit extraire l'angle d'ouverture de cette expression, pour ce faire, on utilise donc l'expression suivante :

$$\frac{K}{L} \cdot U = \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{K}{K} - \frac{K}{L} \right) \cdot W \quad (3.9)$$

Avec :

$$U = b(z) \cdot K_v$$

$$b(z) = -\frac{1}{S} \sqrt{z_1 + \frac{L}{K} \cdot z_2 - \frac{L}{S \cdot K} \cdot W}$$

Ce qui nous donne la relation suivante:

$$K_v = \frac{L}{S \cdot K} \cdot \left(\frac{K}{K} - \frac{K}{L} \right) \cdot W \cdot b(z)^{-1} \quad (3.10)$$

Ainsi K_v obtenu, on pourra à l'aide de la fonction inverse résultante de l'interpolation linéaire de K_v avoir α ; qui est le suivant :

$$\alpha = (K_v + 5465)/117.8 \quad (3.11)$$

Enfin, nous aboutissons à l'angle d'ouverture de la vanne. Ainsi l'organe de commande sera directement affecté par cette grandeur.

Avec la même perméabilité .Le rejet de perturbation engendre (génère) un commande dont le K_v est le suivant :

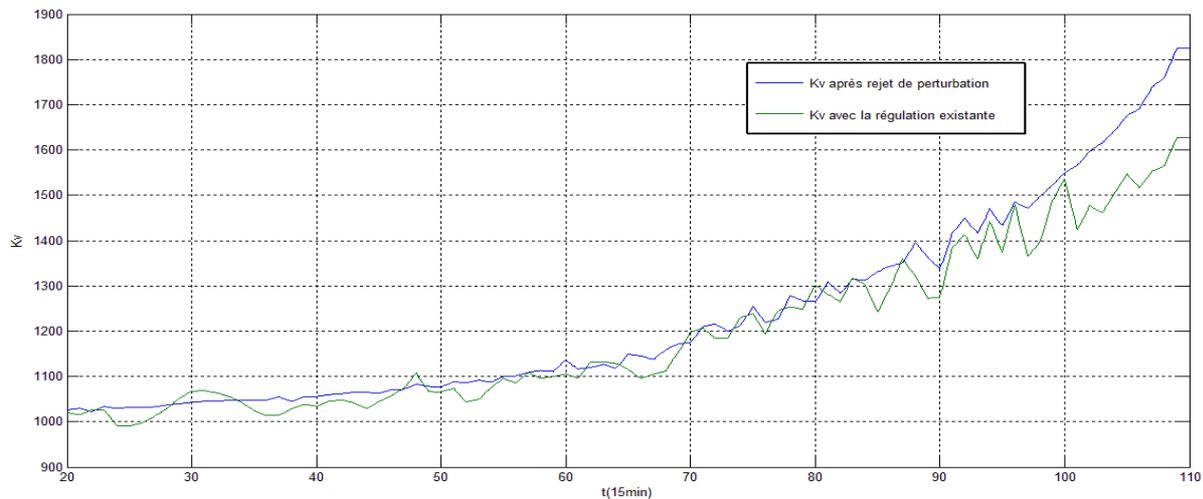


Figure 3.12 : Courbe de l'évolution de K_v après rejet de perturbation comparé à celle de K_v de la régulation existante.

Ainsi, avec l'interpolation linéaire et la fonction inverse qui en résulte. On obtient l'allure de l'angle suivante :

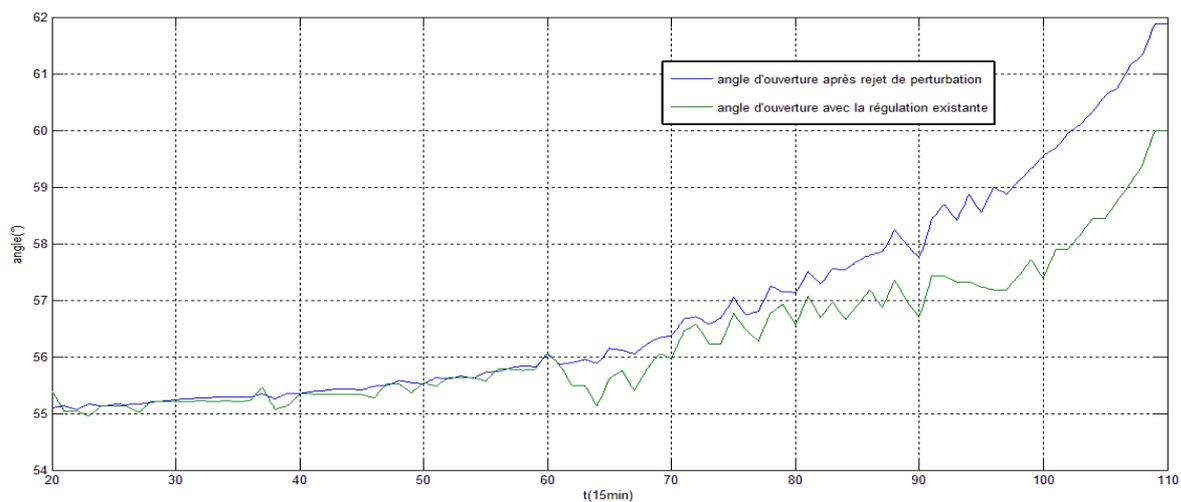


Figure 3.13 : Courbe de l'évolution de l'angle α après rejet de perturbation comparé à celle de l'angle de la régulation existante.

Interprétation :

On voit bien qu'après usage du rejet de perturbation, la pente de la courbe de l'angle d'ouverture de la vanne a tendance à s'adoucir ce qui implique une dérivée de la commande moins importante (moins de variations) dynamique douce « smooth » idéale pour protéger l'actionneur de l'usure rapide électrovanne, vérin ...etc. Prolongeant ainsi sa durée de vie.

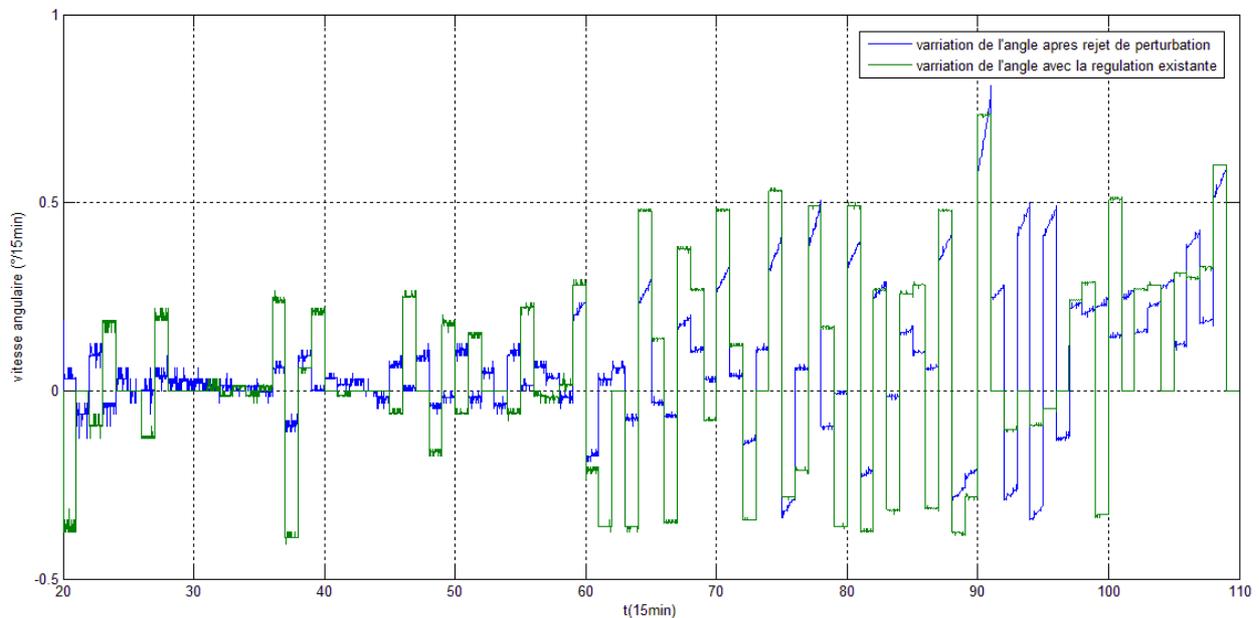


Figure 3.14 : Courbe de la vitesse angulaire après rejet de perturbation comparée à celle de la régulation existante.

3.3.3. Etude énergétique du système avec la nouvelle commande

L'angle d'ouverture définit suffisamment la commande appliquée, la variation de l'angle engendre une excitation de l'actionneur. Ce qui implique une dépense d'énergie. A partir de la figure (3.14), on extrait les critères concernant la consommation d'énergie et la commande.

Le critère de la consommation d'énergie atteint 0.4644 pour la nouvelle commande et 4.1420 pour la régulation avec action dérivée, soit une différence de 3.6776 unités par cycle représentant une baisse de 88.79% qui exprime une économie importante de l'énergie consommé.

Le critère de la commande atteint 6.1496 pour la nouvelle commande et 14.5825 pour la régulation avec action dérivée, soit 8.4329 de différence représentant une baisse de 57.82%, ce qui exprime une commande moins énergétique.

3.3.4. Robustesse de la commande vis-à-vis des variations de la perturbation

Pour vérifier la robustesse du système muni de sa commande à la variation de la perturbation (débit entrant au filtre), nous proposons de considérer le signal suivant comme débit entrant au filtre :

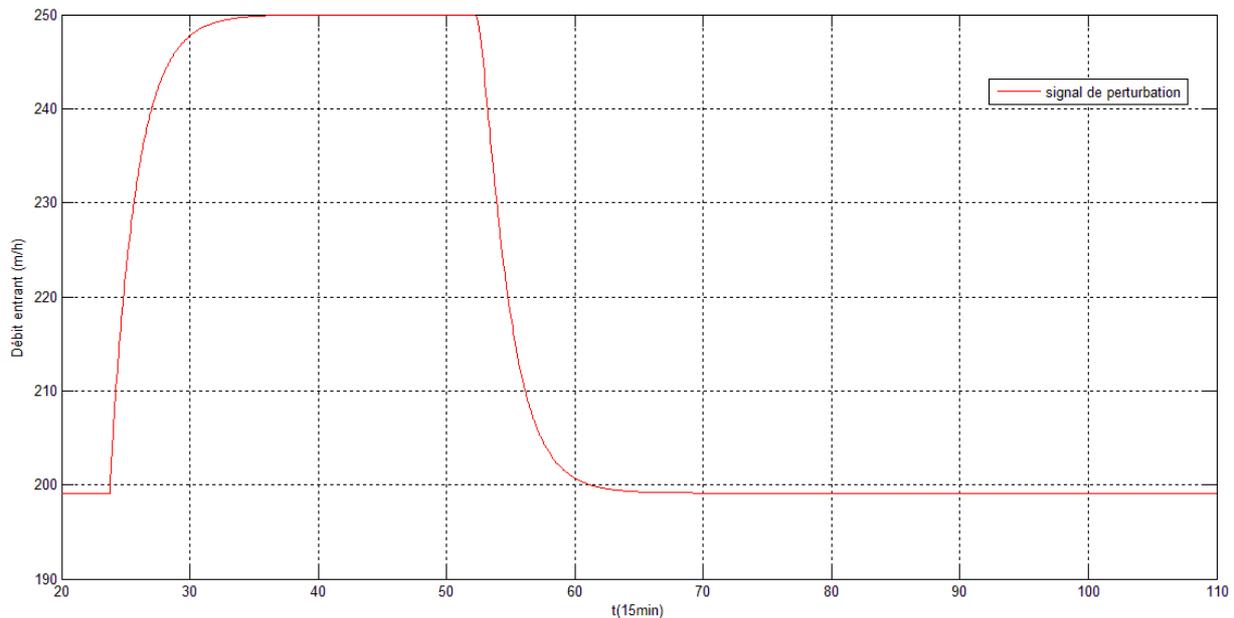


Figure 3.15 : Courbe de la nouvelle perturbation.

Interprétation :

Ce signal décrit une variation brusque du débit entrant (débit alimentant le filtre), l'insertion de ce signal comme perturbation déterminera la robustesse et le comportement du système vis-à-vis de ce genre d'anomalies qui peut survenir à n'importe quel moment.

L'insertion d'une impulsion (discontinuité) proprement dit est physiquement aberrant ; le système ne peut pas avoir ce genre de variation momentanée.

En outre, une impulsion risque de causer de grandes fluctuations qui par la suite détérioreront le floc lit filtrant.

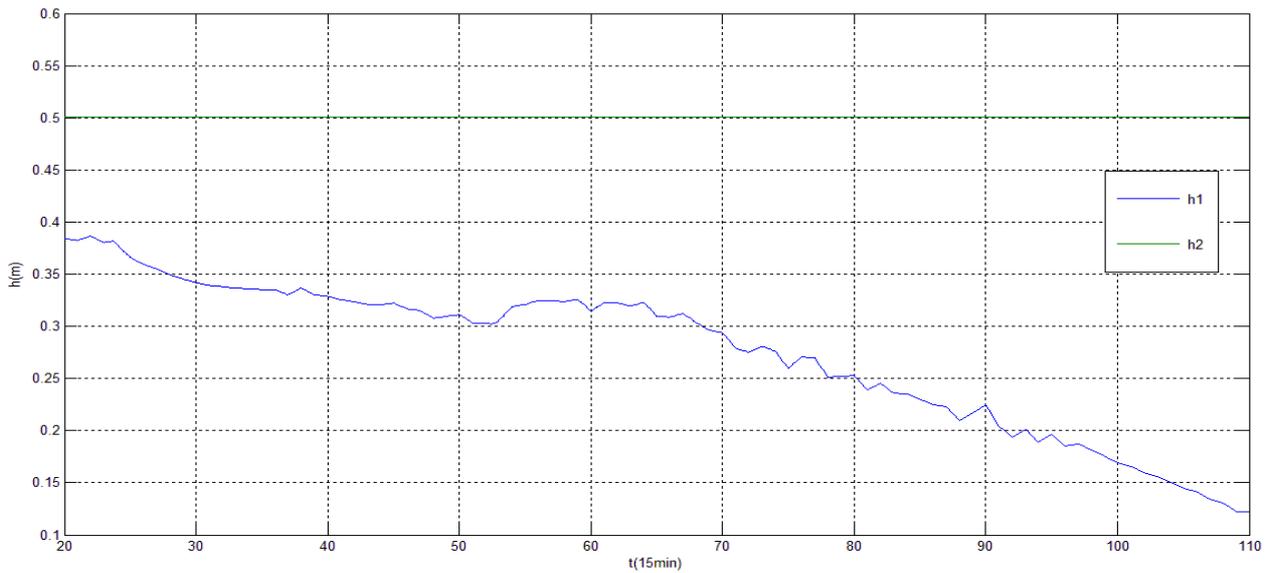


Figure 3.16 : Courbe de l'évolution des hauteurs après injection de la nouvelle perturbation.

Interprétation :

On voit bien que la sortie est toujours maintenue à la consigne avec une somme d'écart quadratique de $4.75 \cdot 10^{-6}$ pour h1 (sortie du système), et ce malgré la présence d'une variation brusque au niveau du débit entrant (perturbation). Ce qui met en évidence la robustesse du système vis-à-vis des variations de la perturbation.

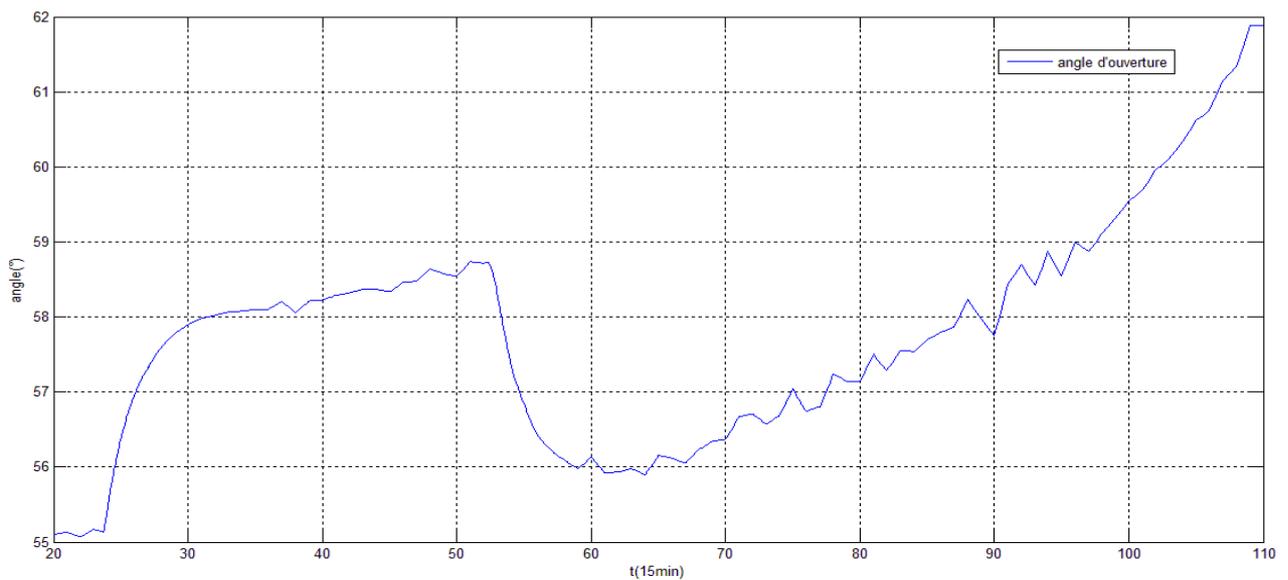


Figure 3.17 : Courbe de l'évolution de l'angle α après injection de la nouvelle perturbation.

Interprétation :

La courbe ci-dessus représente l'adaptation de la commande à la variation de la perturbation et ce dans l'objectif de maintenir le niveau h1 constant, malgré la variation brusque du débit entrant.

3.3.5. Excitation de l'actionneur et conversion du signal

Pour déterminer le sens et le degré de rotation de la vanne, on proposera deux méthodes suivantes :

a) **Détermination de l'angle d'ouverture en boucle ouverte :**

Pour exciter l'actionneur (électrovanne) avec l'angle d'ouverture α et atteindre ainsi l'angle désiré, on procède en adoptant la démarche suivante :

- **Détermination de la nature de l'évolution :**

On considérera la vitesse angulaire (variation de l'angle) comme indicateur permettant de définir la nature de l'action (fermeture, ouverture, équilibre), et cela en s'appuyant essentiellement sur le signe de cette grandeur (vitesse angulaire).

Le tableau suivant illustre la définition précédente :

$\frac{d\alpha}{dt}$	Nature de l'action	Etat EV1	Etat EV2
= 0	Equilibre	1	0
<0	fermeture	0	0
>0	ouverture	1	1

Tableau 3.2: Illustration de la méthode de détermination de la nature de l'action (en boucle ouverte).

- **Détermination du degré de l'évolution :**

On établira une relation entre amplitude de la variation $\left| \frac{d\alpha}{dt} \right|$ et la durée de l'impulsion appliquée sur l'électrovanne de telle sorte qu'elles soient proportionnelles .l'expression suivante illustre cette définition :

$$T = A \cdot \left| \frac{d\alpha}{dt} \right|$$

T : durée de l'impulsion en (sec)

A : coefficient de proportionnalité, déterminé expérimentalement.

$\frac{d\alpha}{dt}$: vitesse angulaire (°/s).

NB : la nature de l'action sera exprimée ultérieurement, lors de l'implémentation par la fonction « $\text{sign}\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ ».

Sachant qu'à l'état initial, la vanne est ouverte à 50% c'est-à-dire l'angle d'ouverture α_0 est égale à 45°, cette nouvelle stratégie de conversion du signal permet de s'en passer du signal de la recopie position vanne, ce qui en fera un capteur en moins.

b) Détermination de l'angle d'ouverture en boucle fermée :

Cette méthode exige une rétroaction qui sera en provenance de la recopie position vanne, et sera injectée un à soustracteur placé en amont de l'actionneur. L'écart en sortie définira l'injection ou pas d'une impulsion au niveau des électrovannes et par la suite sera réorientée par la nature de cet écart résultant.

Nature de l'écart ε	Nature de l'action	EV1	EV1
> 0	ouverture	1	1
= 0	équilibre	1	0
< 0	fermeture	0	0

Tableau 3.3 : Illustration de la méthode de détermination de l'angle α (en boucle fermée).

La détermination de degré de l'évolution l'angle par la méthode de la boucle fermée exige la présence de la recopie position, mais elle assure une précision irréprochable.

3.3.6. Retard de phase engendré par la vanne

Lors de la conversion du signal électrique (commande de l'actionneur) en un signal mécanique (angle de rotation de la vanne), se produit un retard engendré par l'inertie du dispositif mécanique de l'actionneur (vérin, bielle, vanne), le dispositif aura donc une dynamique assez lente par rapport aux exigences du système (commande). On assimile donc le dispositif à un système de premier ordre avec sa propre dynamique exprimée par λ , pole du système.

L'actionneur étant sensible aux variations de l'angle, nous impose l'insertion d'un dérivateur à son amont. La prise en considération de ces deux spécifications donne naissance au transfert suivant :

$$\alpha_m(s) = \frac{s}{\tau \cdot s + 1} \cdot \alpha_e(s) \quad (3.12)$$

s : Variable de Laplace.

$\alpha_m(s)$: La transformée de Laplace de l'angle de rotation de la vanne.

$\alpha_e(s)$: La transformée de Laplace du signal de commande issue du rejet de perturbation.

λ : Pole du dispositif mécanique déterminée expérimentalement en analysant la courbe en sortie (extraction du temps de réponse t_r ou bien la constante du temps τ).

τ : Constante du temps du système mécanique.

Remarque :

La dynamique de la partie mécanique de l'organe de commande n'affectera pas d'une manière considérable le système, car la commande agira d'une manière instantanée, ayant donc de faibles amplitudes ; qui sont faciles à atteindre ce qui génère un retard de phase pour le système qui est négligeable, et vu aussi l'inertie du système (système hydraulique) et qui est assez lente.

4. Perspectives :

La perspective principale consiste à implémenter le programme issu de cette nouvelle commande. L'implémentation logicielle s'accompagne d'une implémentation matérielle adéquate.

4.1. Implémentation logicielle :

On proposera d'établir l'algorithme suivant :

Début du programme

Etape 1 : initialisation des données

Constante :

$$\Delta k = 1s$$

$$S=63$$

$$\rho g=0.1$$

$$L=1.2$$

$$Q_e=199.125$$

Variable :

$h_{1\text{mesuré}}$, $h_{2\text{mesuré}}$, Q_f , Δh , P_{er} , b , U , K_v , α , $\Delta\alpha$, $\Delta h_{1\text{mesuré}}$, T : réel.

EV1, EV2 : booléen

} Détermination
Période
d'échantillonnage

Etape 2 : Vérification des conditions de démarrage de la filtration

Si ((pas de défaut capteurs niveau filtre **ET** pas de défaut automate **ET** pas de commutation sur arrêt filtre **ET** de commutation sur maintenance **ET** $h_2 > 0.1$) =1)

Faire

Aller à l'étape 3

Sinon

Faire

Aller à l'étape 6

Fin de Si

Etape 3 : Identification de la perméabilité en ligne à chaque instant k

$$\frac{\Delta h_{1\text{mesuré}}(k)}{\Delta k} = (h_{1\text{mesuré}}(k) - h_{1\text{mesuré}}(k - 1)) / \Delta k \quad \left. \vphantom{\frac{\Delta h_{1\text{mesuré}}(k)}{\Delta k}} \right\} \begin{array}{l} \text{calcul de la dérivée par} \\ \text{L'approximation d'Euler} \end{array}$$

$$Q_f(k) = S * \frac{\Delta h_{1\text{mesuré}}(k)}{\Delta k} + Q_e \quad \left. \vphantom{Q_f(k)} \right\} \text{Calcul du débit de filtration}$$

$$\Delta h(k) = h_{1\text{mesuré}}(k) - h_{2\text{mesuré}}(k) \quad \left. \vphantom{\Delta h(k)} \right\} \text{Calcul de la perte de charge}$$

$$P_{er}(k) = L / (S * \Delta h(k)) * Q_f(k) \quad \left. \vphantom{P_{er}(k)} \right\} \text{Calcul de la perméabilité}$$

Etape 4 : Calcul de la commande à appliquer

$$b(k) = -\text{sqrt}(\rho g * h_2(k)) / S \quad \left. \vphantom{b(k)} \right\} \begin{array}{l} \text{Fonction du retour d'état} \\ \text{linéarisant} \end{array}$$

$$\frac{\Delta P_{er}(k)}{\Delta k} = (P_{er}(k) - P_{er}(k - 1)) / \Delta k \quad \left. \vphantom{\frac{\Delta P_{er}(k)}{\Delta k}} \right\} \begin{array}{l} \text{Calcul de la dérivée de la} \\ \text{Perméabilité} \end{array}$$

$$U(k) = \frac{L}{S \cdot P_{er}(k)} * \left(\frac{\Delta P_{er}(k)}{\Delta k} - \frac{P_{er}(k)}{L} \right) * Q_e$$

} **Fonction de la commande**

$$K_v(k) = U(k) * b(k)^{-1}$$

} **Calcul de coefficient
d'écoulement**

$$\alpha(k) = (K_v(k) + 5465)/117.8$$

} **Calcul de l'angle α**

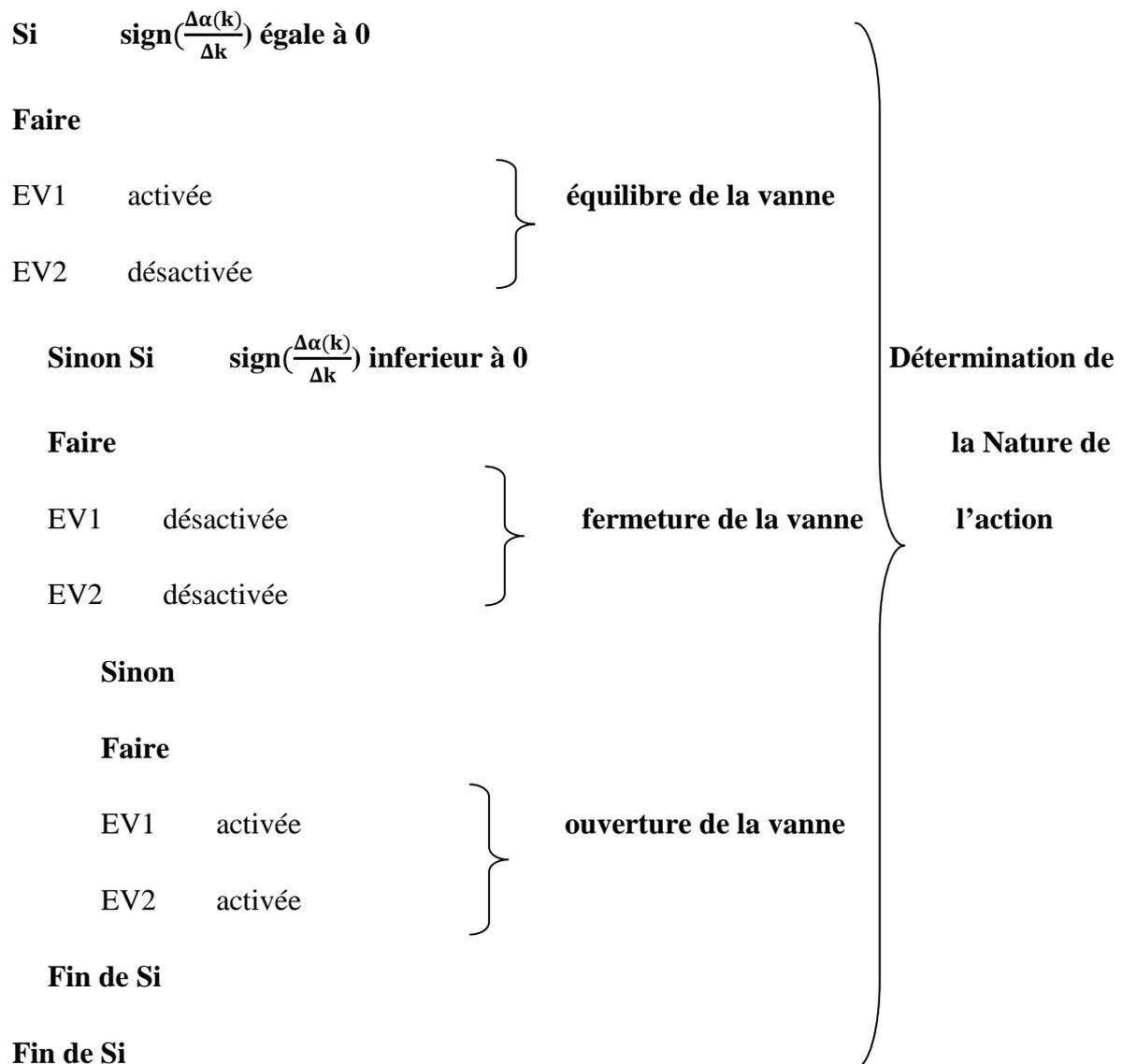
Etape 5 : Calcul du signal transmis à l'actionneur

$$\frac{\Delta \alpha(k)}{\Delta k} = (\alpha(k) - \alpha(k - 1))/\Delta k$$

} **Calcul de la dérivée de la
L'angle α**

$$T(k) = A \cdot \left| \frac{\Delta \alpha(k)}{\Delta k} \right|$$

} **Calcul la durée de
L'impulsion du signal
excitant les électrovannes**



Fin de Si

K=k+1

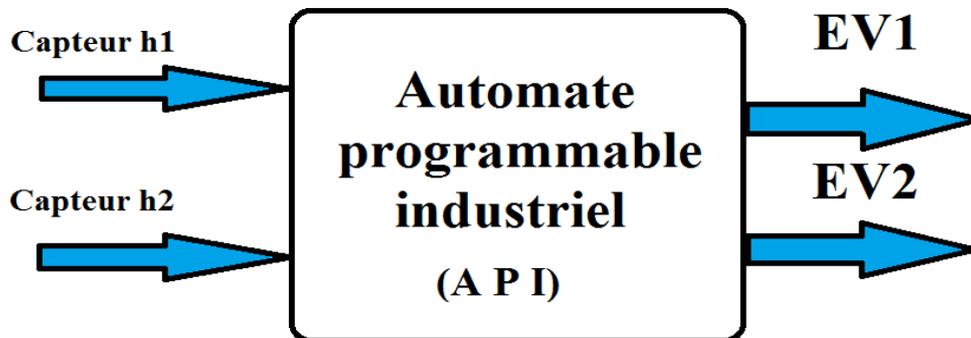
Revenir à l'étape 2

Etape 6 : Fin de la filtration

Fin du programme

4.2. Implémentation matérielle

Pour l'implémentation matérielle, nous place la mise en place du schéma suivant : **Figure**



3.18 : Représentation de l'implémentation matérielle.

Concernant le choix de l'automate, on propose le **SOFREL S550** de la firme **LACROIX**, ayant comme avantage principale et la possibilité de communiquer l'information et d'en recevoir via ses modules de communication (GSM et ETHERNET), nous lui associerons un module d'entrées 4 AI, pour le raccordement des deux capteurs de niveaux (h1, h2) et un module de sorties 8DO pour la commande des deux électrovannes.

Le **SOFREL S550** se programme par le langage ST (structured text), via le logiciel **Softool**, un logiciel interactif et facile à maîtriser.

Remarque :

L'opération de l'identification de la perméabilité et du coefficient d'écoulement K_v s'est effectuée avec l'automate cité précédemment, et ce en lui associant un module 4AI, pour le raccordement des 03 capteurs, et qui sont respectivement (capteur h1, capteur h2, recopie position vanne). l'automate **SOFREL S550** possède une capacité d'archivage considérable qui a permet d'enregistrer plusieurs cycles de filtration.



Figure 3.19 : Automate programmable (SOFREL S550).

5. Conclusion

Le rejet de perturbation a permis d'améliorer les performances du système en minimisant l'énergie mise en service. Par conséquent, le système devient moins gourmand en matière d'énergie d'une manière suffisante pour faire fonctionner l'actionneur en étant plus précis, robuste et moins brusque augmentant ainsi la durée de vie de l'organe de commande.

Cette nouvelle commande permet aussi d'affecter la dynamique du système d'une manière précise et rigoureuse. Par le biais de cette commande, on pourra ajouter un retour d'état qui imposerait une dynamique désirée au système. Ce qui représente l'un des avantages principaux de cette commande.

Conclusion générale

Dans notre travail, nous nous sommes attelés à l'étude du fonctionnement du processus de filtration dans la station de production d'eau potable sise à Boudouaou. Cette étude comprend le procédé physique et son système de commande. La finalité de cette étude est de proposer un modèle mathématique qui permet de décrire de manière assez fidèle les phases les plus importantes de ce processus de filtration.

Notre travail a commencé par une phase d'intervention sur le terrain. Cette phase a consisté à comprendre le fonctionnement du processus, à relever les différentes mesures qui serviront à la construction du modèle. Il a fallu, en particulier, identifier le paramètre de perméabilité qui est variable au cours du temps.

L'application des lois physiques d'écoulement, principalement la loi de Darcy, associée aux relevés de mesures nous a permis de proposer un modèle dynamique dit mixte sous forme d'équations d'état non linéaires. Ce modèle a été validé en comparant les résultats de simulations réalisées sous l'environnement Matlab/Simulink aux mesures prélevées sur le procédé. L'intérêt d'élaborer un tel modèle est double.

D'une part, ce modèle peut être utilisé pour une meilleure compréhension du fonctionnement du procédé en identifiant le rôle de chaque élément sur les performances du procédé de filtration. Cette analyse peut servir à une meilleure conception du système en apportant des modifications sur le dimensionnement de certains éléments.

D'autre part, le modèle peut être exploité afin de concevoir une nouvelle stratégie de commande. C'est dans cet objectif que nous avons proposé dans le troisième chapitre, une commande linéarisante permettant de rejeter la perturbation due à un remplissage inopiné de la cuve. A près avoir étudié le schéma de commande existant sur la station qui est composé d'une simple boucle de régulation avec un retour de vitesse interne, nous avons testé en simulation les performances de la commande proposée. Les résultats obtenus confrontés à ceux du système de commande existant sont très prometteurs. En plus du rejet de perturbation qui a été quasi parfait, d'autres avantages en particulier sur la sollicitation des actionneurs (ouverture, fermeture de vannes) ont été constatés en analysant les signaux de commande.

Nous avons aussi essayé d'apporter une réflexion sur l'implémentation sur automate de la commande proposée en élaborant l'algorithme et

Le travail que nous avons réalisé a été constructif sur plusieurs plans. Il nous a permis d'aborder un problème réel industriel, d'exploiter nos connaissances théoriques pour proposer une contribution en vue de l'amélioration des performances d'un procédé physique.

L'étude menée dans ce projet n'est qu'un premier sillon à de futurs travaux plus approfondis. Nous espérons que d'autres études puissent être engagées sur les points suivants :

- Affiner encore plus le modèle
- Implémenter la commande sur l'automate

Bibliographie

- [01] LENCASTRE Armando. *Hydraulique générale*. Eyrolles, France.2008.
- [02] LACHAL Alain. LEVY Marc. *Hydraulique*. Centre national de la fonction publique territoriale, France.1994.
- [03] DESJARDINS Raymond. *Le traitement des eaux*. Ecole polytechnique de Montréal, Montréal.1990.
- [04] AUDOYE Paul. *Mécanique des fluides*. Masson, Paris.1992.
- [05] PRODIN Bernard. GARCIA Germain. *Modélisation, analyse et commande des systèmes linéaires*. Presses universitaire de Mirail, Toulouse. 2009.
- [06] LANDU Ioan Doré. *Commande des systèmes, conception, identification et mise en œuvre*. Lavoisier, Paris. 2002.
- [07] MINZU Vioret.LANG Bernard. *Commande automatique des systèmes linéaires continus. Cours avec application utilisant Matlab*, Ellipses. Paris. 2001.
- [08] CROSNIER André. JOUVENCEL Bruno. ABBA Gabriel. ZEPATA René *Ingénierie de la commande des systèmes, technique de base*. Ellipses, Paris.2001.
- [09] VALENTIN Nicolas. *Construction d'un capteur logiciel pour le contrôle automatique du procédé de coagulation en traitement d'eaux potable*. Thèse de Doctorat. France: Compiègne, 2000.
- [10] BENMACHOU Kader. *Etude et modélisation du colmatage d'un filtre plisse*. Thèse de Doctorat. INP Toulouse, 2005.
- [11] Degrémont, mémento technique de l'eau : Tome 1, Lavoisier-technique et documentation, Paris, 1989.
- [12] Degrémont, mémento technique de l'eau : Tome 2, Lavoisier-technique et documentation, Paris, 1988