

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie électrique »

Option :

«Automatique des systèmes de production»

Titre :

MODÉLISATION D'UN PROCESSUS D'ÉPURATION
PAR LA LOGIQUE FLOUE

Réalisé par :

BEN MIRA ZITOUNI Mustapha

BENCHAIB El-mehdi

Encadré par :M^{me} Tidjani Nawel

Année Universitaire 2015

Remerciements

Remerciement à dieu pour la volonté, la santé et la patience et qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promotrice M^{me}, TIDJANI Nawel d'avoir accepté de nous encadrer et pour le suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas cessé de nous donner ses conseils et des remarques.

Nos remerciement vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participant au jugement de ce travail.

DÉDICACE

*AVANT TOUS, JE REMERCIE DIEU LE TOUT
PUISSANT DE M'AVOIR DONNÉ LE COURAGE ET
LA PATIENCE POUR
REALISER CE TRAVAIL MALGRÉ TOUTES LES
DIFFICULTÉS RENCONTRÉES.*

*JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :
A MES TRÈS CHERS PARENTS, QUE DIEU LES
GARDE ET LES PROTEGE POUR LEURS SOUTIEN
MORAL ET FINANCIER, POUR LEURS
ENCOURAGEMENTS ET LES SACRIFICES QU'ILS
ONT ENDURÉS.*

*A MES FRÈRES : SOFIANE, MOHAMMED, OUSSAMA,
YOUNES.*

A MES SŒURS : HAYAT ET SA MARIE.

*A LA JOIE DE LA MAISON, MA
NEVEU : OTHMAN*

*AUX CHERS AMIS : ABDELLEAH, LOUZ, ABDELKADER,
FOUAD, MOHAMMED, SID ALI, MOURAD, HAMID, DJILALI*

A TOUS LES FAMILLES : BEN MIRA ZITOUNI, AICHOUNI.

MUSTAPHA

DEDICACES

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A MES CHERS PARENTS.

*MA MERE POUR M'AVOIR MIS AU MONDE ET POUR M'AVOIR
ACCOMPAGNE TOUT LE LONG DE MA VIE.*

MON PERE QUI SANS LUI JE NE SERAIS PAS ARRIVE JUSQU'ICI.

*J'ESPERE TOUJOURS RESTER FIDELE AUX VALEURS MORALES QUE VOUS
M'AVEZ APPRISES.*

A TOUS MES SCEURS, MON FRERE ET TOUTE MA FAMILLE.

A TOUS MES AMIES ET MES COLLEGUES.

EL-MEHDI

Résumé

Un outil mathématique pour construire un modèle flou d'un système où les implications floues et le raisonnement sont utilisés est présenté dans le mémoire. Le principe d'une implication est la description du sous-espace flou d'entrées et de ses conséquences est une relation d'entrée-sortie linéaire. La méthode d'identification d'un système utilisant les données d'entrée-sortie est alors affichée. Une application du procédé pour un procédé industriel est également discutée: un procédé de nettoyage de l'eau.

Abstract

A mathematical tool to build a fuzzy model of a system where fuzzy implications and reasoning are used is presented in this project. The premise of an implication is the description of fuzzy subspace of inputs and its consequence is a linear input-output relation.

The method of identification of a system using its input-output data is then shown. One application of the method to industrial processes are also discussed: a water cleaning process.

NOTATION ET SYMBOLES

ERI : Eaux Résiduaire Industrielle

STEP : Station De Traitement Des Eaux Polluées.

MES : Matière En Suspension

HPA : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

Hg : Mercure

Cr : Chrome

Ti : Titane

Cu : Cuivre

Co : Cobalt

Ni : Nickel

Pb : Plomb

Zn : Zinc

CN^- : Cyanure

H_2O : Eau

HCN : Cyanure D'hydrogène

OH^- : Hydroxyde

NH_3 : Ammoniac

NH_4^+ : Ammonium

NO_2 : Dioxyde D'azote

NO_2^- : Nitrite

NO_3^- : Nitrate

PH : Potentiel D'hydrogène

DCO : Demande Chimique En Oxygène

DBO : Demande Biologique En Oxygène

DBO₅ : Demande Biologique En Oxygène Pendant Cinq Jours

DBO₂₁ : Demande Biologique En Oxygène Pendant Vingt Tien Jours

MOX : Matières Organiques Oxydable

CO₂ : Dioxyde De Carbone

O₂ : Oxygène

PT :Phosphore Total

PO₄H₂ :Orthophosphate

Cd :Cadmium

H⁺ : Ion Hydrogène

OH⁻ : Ion D'hydroxyde

mg : Milligramme

l : Litre

~m : Nanomètre

HC : Hydrocarbure

mm : Millimètre

PAC : Polychlorure Basique D'aluminium

AL : Alcalinité

TUB1 : Turbidité De L'eau D'origine (Ppm).

TUB2 : Turbidité De L'eau Traitée (Ppm).

TE : Température

m/s : La Vitesse

NT : Azote Total

COT : Carbone Organique Total

m : Mètre

s : Seconde

A : Sous-Ensembles Flous

A^c : Complément De *A*

X : Un Univers Du Discours

x : Élément X

\sim_A : Degrés D'appartenance De A

B : Sous-Ensembles Flous

\sim_B : Degrés D'appartenance De B

\in : Appartient

\subseteq : Inclusion

\forall : Quel que Soit

\leq : Inférieure

\cup : Union

\cap : Intersection

min : Minimum

max : Maximum

V : La Variable Définie Sur L'univers Du Discours X .

$T(V)$: Un Ensemble Des Termes Linguistiques

G : Un Ensemble De Règles Syntaxiques Qui Permettent Former D'autres Termes
Linguistiques A Partir De $T(V)$

M : L'ensemble Des Règles Sémantiques Qui Permettent De Définir Les Termes
Linguistiques

A_1, A_2, \dots, A_n : Un Ensemble Des Termes Linguistiques

\sim_{pas} : Fonction D'appartenance Du Terme Linguistique «Pas A »

p : Le vecteur de paramètre de conséquence.

x_1, \dots, x_m : Les Eléments Des Univers Du Discours X_1, \dots, X_m

X_1, \dots, X_m : Les Univers Du Discours

$A_{j_i} (j = 1, \dots, m)$: Les Quantités Floues Sur L'univers Du Discours X_i

X_i : Univers du discours.

$B_j (j = 1, \dots, m)$: Les Quantités Floues Sur L'univers Du Discours Y

Y : Univers Du Discours.

i : i – ème Règle Du Modèle

A_i : Le Sous-Ensemble Flou De L'antécédent De L' i – *Eme* Règle

r : Le Nombre De Règles Que Contient La Base De Règles.

\sim_{R_i} : Fonction D'appartenance

y : Variables De La Conséquence Dont La Valeur Est L'implication Présumentées.

y_{cg} : Centre de gravité.

R_i : La i – *Eme* Règles Floues

R^i : Implications

μ_{A_i} : Fonction D'appartenance (Multi Variable)

$x_1 - x_k$: Variables De La Prémisse Qui Apparaît Aussi Dans La Partie De La Suite.

$A_1 - A_k$: Ensembles Flous Avec Des Fonctions D'appartenance Linéaire Représentant Un
Sous-Espace Flou Dans Lequel L'implication R Peut Etre Pour Le Raisonnement.

f : Fonctions Logique Relie Les Propositions De La Prémisse.

g : Fonctions Qui Implique La Valeur De g .

x_1, \dots, x_k : Les Variables Qui Composent Les Prémises De Conséquences.

A_1, \dots, A_k : Fonctions d'appartenance des Ensembles Flous Dans Les Prémises, En Abrégé
Paramètres De La Prémisse.

p_1, \dots, p_k : Les Paramètres Dans Les Conséquences.

$|*$: La Valeur De Vérité

\wedge : Proposition Qui Tient Le Fonctionnement « Et »

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III : SIMULATION ET APPLICATION A LA MODELISATION FLOUE TYPE TAKAGI-SUGENO

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 : Schéma d'une commande floue..... | 45 |
| Tableau III.2 : Indice de performance par modèle..... | 47 |
| Tableau III.3 : Indices de performance par modèle de deux variables..... | 48 |
| Tableau III.4 : Indices de performance par modèle de trois variables..... | 55 |
| Tableau III.5 : Illustration des résultats flous, statiques et mesurés..... | 63 |

Annexe A

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Exemple d'un processus de raisonnement par chaque implication..... | 73 |
|--|----|

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II : LA MODELISATION FLOUE TYPE TAKAGI-SUGENO

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Système d'inférence flou..... | 27 |
| Figure II.2 : Schéma d'une commande floue..... | 30 |
| Figure II.3 : Aperçus de l'identification du modèle flou de type Takagi-Sugeno..... | 34 |
| Figure II.4 : Choix des variables de la prémisse..... | 36 |

CHAPITRE III : SIMULATION ET APPLICATION A LA MODELISATION FLOUE TYPE TAKAGI-SUGENO

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Schéma de nettoyage de l'eau..... | 43 |
| Figure III.2 : Schéma du processus de contrôle..... | 43 |
| Figure III.3 : fonction d'appartenance de la variable PH..... | 47 |
| Figure III.4 : sortie du modèle flou avec la variable (TE) dans la prémisse..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figure III.5 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE) dans la prémisse..... | 49 |
| Figure III.6 : Fonction d'appartenance de la variable TE divisé en 4 sous espaces flous..... | 50 |
| Figure III.7 : Fonctions d'appartenance des variables dans l'antécédent..... | 52 |
| Figure III.8 : Sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH) dans la prémisse donnant un indice de performance égal à 41.86..... | 53 |
| Figure III.9 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE, PH) dans la prémisse..... | 54 |
| Figure III.10 : Fonction d'appartenance des variables TE, PH et AL..... | 56 |
| Figure III.11 : Sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisse Donnant un indice de performance égal à 18.08..... | 57 |
| Figure III.12 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisse avec indice de performance= 18.08..... | 57 |
| Figure III.13 : Fonctions d'appartenances..... | 58 |
| Figure III.14 : sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH) dans la prémisse donnant un indice de performance égal à 14.3..... | 59 |

Figure III.15 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique
avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisse avec indice de performance= 14.3....59

Figure III.16 : Fonction d'appartenance.....60

Figure III.17 : sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH) dans la prémisse donnant
un indice de performance égal à 4.89.....61

Figure III.18 : statique, PAC modèle flou et PAC de l'expert.....64

Figure III.19 : erreurs PAC modélisation et expert_ PAC statique.....65

Table des matières

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Pollution des eaux..... | 4 |
| I.2.1 Définition des eaux résiduaires industrielles | 4 |
| I.2.2 Origine des polluants et types de pollutions industrielles | 4 |
| I.2.2.1 Pollution physique | 4 |
| I.2.2.1.1 Pollution mécanique | 4 |
| I.2.2.1.2 Pollution thermique | 5 |
| I.2.2.1.3 Pollution radioactive..... | 5 |
| I.2.3 Pollution chimique..... | 5 |
| I.2.3.1 Pollution organique..... | 5 |
| I.2.3.2 Pollution minérale..... | 7 |
| I.2.4 Pollution microbiologique | 8 |
| I.2.5 Paramètres de mesure de la pollution | 8 |
| I.2.5.1 Paramètres organoleptiques | 8 |
| I.2.5.2 Paramètres physiques | 8 |
| I.2.5.3 Paramètres chimiques | 9 |
| I.2.5.4 Autres paramètres | 10 |
| I.3 L'eau de surface..... | 11 |
| I.3.1 Eaux de rivière (partie amont) | 11 |
| I.3.2 Eaux de rivière (partie aval) | 11 |
| I.4 Le traitement des eaux | 11 |
| I.4.1 Caractéristiques des matières polluantes | 12 |
| I.4.1.1 Matières en suspension..... | 12 |
| I.4.1.2 Matières colloïdales..... | 12 |
| I.5 Les paramètres mesurables pour évaluer la qualité de l'eau | 12 |
| I.5.1 La température | 12 |
| I.5.2 Le pH | 12 |
| I.5.3 L'alcalinité..... | 13 |
| I.5.4 La turbidité | 13 |
| I.6 Les différents traitements du processus d'épuration d'eau | 13 |
| I.6.1 Les prétraitements..... | 13 |
| I.6.1.1 Dégrillage | 14 |
| I.6.1.2 Dessablage | 14 |
| I.6.1.3 Déshuilage dégraissage..... | 14 |

| | |
|--|----|
| I.6.2 Traitements primaires | 15 |
| I.6.2.1 La décantation..... | 15 |
| I.6.2.2 La filtration | 15 |
| I.6.2.3 La flottation | 16 |
| I.6.2.3.1 Types des procédés de flottation | 16 |
| I.6.3 Les traitements physico-chimiques | 17 |
| I.6.3.1 Élimination de la pollution colloïdale | 17 |
| I.6.3.2 Coagulation..... | 17 |
| I.6.3.2.1 Coagulants utilisés | 18 |
| I.6.3.2.2 L'effet des différents paramètres sur la coagulation | 18 |
| I.6.3.2.2.1 Effet de la température | 18 |
| I.6.3.2.2.2 Effet du pH | 19 |
| I.6.3.2.2.3 Effet de la turbidité | 19 |
| I.6.3.3 Floculation | 20 |
| I.6.3.4 Décantation..... | 20 |
| I.6.3.4.1 Types de décantation | 21 |
| I.7 CONCLUSION | 22 |

INTRODUCTION GENERALE

En automatique, un contrôleur calculé pour un modèle donné du procédé, peut lorsqu'il est implanté produire des performances assez éloigné de celles prévues et parfois même provoquer l'instabilité du système en boucle fermé. Ceci est du aux incertitudes sur le modèle et/ou aux variations de certains paramètres. Aussi la robustesse des contrôleurs est-elle devenue un important critère de la conception des systèmes commandés en boucle fermée. Celle-ci est définie alors comme la capacité de ces systèmes à garder performances et/ou stabilité dans un domaine prédéfini en débit des incertitudes et variations. Un nouveau domaine de recherche en automatique, la commande robuste, est alors apparu au milieu des années 1980 et plusieurs méthodes de conception ont alors été proposées. Le point commun de ces méthodes est la prise en compte des incertitudes sur les modèles, représentées par des intervalles de variations, dans la conception des contrôleurs [1].

La raison pour laquelle les gens se consacrent ardemment à la logique floue est très simple parce que l'inférence floue est basée sur la connaissance humaine et le bon sens, il est intuitif et facile à comprendre. Le modèle exact de l'usine n'est pas nécessaire pour la conception de contrôleur flou. De plus-plus, la logique floue peut être facilement combinée avec des techniques de contrôle classique et peut être utilisé en coordination [2].

Un premier pas a été effectué dans ce sens par l'utilisation de la notion d'intervalle floue. Dans ce cas le modèle du procédé est représenté avec des paramètres défini sur des intervalles flous et quelques algorithmes de modélisation de systèmes dynamiques et de conception de contrôleurs relativement simples ont alors été proposés [1].

Le modèle flou proposé par Takagi et Sugeno est décrit par les règles flous si-alors qui représente les relations entrées-sorties locales d'un système non linéaire. Le principe d'un modèle flou de Takagi- Sugeno est d'exprimer les implications floues (règle) par un modèle de système linéaire. Dans ce mémoire, le lecteur trouvera, dans la simulation, que les systèmes dynamiques non linéaires presque tous peuvent être représentés par des modèles flous de Takagi- Sugeno à haut degré de précision. En fait, il est prouvé que les modèles flous Takagi – Sugeno sont approximateurs universels de tout système non linéaire [3].

La technique séparative par coagulation floculation est utilisée dans le processus d'épuration des eaux, l'eau de la rivière, après ajustement du pH, arrive au niveau du réacteur de

précipitation où un coagulant est introduit. L'opération de mélange est critique, et la quantité du PAC déversé par l'opérateur, doit être déterminée de manière à ce que la turbidité de l'eau traitée soit maintenue au dessous d'un certain seuil de tolérance. Le processus de station d'épuration des eaux, est un système dynamique. Les lois physiques décrivant le système sont trop complexes et régies par des paramètres variables qui peuvent changer selon plusieurs critères. Le problème apparaît lorsque la quantité du coagulant (PAC) déversé dans le réservoir n'est pas optimal, de ce fait l'agglomération des impuretés, sera mal faite et la turbidité de l'eau traitée, mauvaise. Il est alors nécessaire d'avoir un modèle adéquat qui permettra de surmonter ce problème et qui représentera d'une manière optimale le système d'épuration de l'eau. Notre travail consiste en une contribution à la modélisation des décisions d'un opérateur humain habile et expérimenté, pour la détermination des quantités du composé chimique (PAC) à ajouter à l'eau de surface afin d'optimiser le rendement du processus (turbidité de l'eau après le traitement) [5].

Ce mémoire contient trois chapitres :

Le premier chapitre concerne le traitement de l'eau, qui présente quelques modes d'épuration ou de traitement des eaux, lorsqu'ils arrivent jusqu'à la station d'épuration contiennent, des matières en suspensions (déchets divers, sables) et des huiles, des matières organiques, des substances minérales. Afin de nettoyer les eaux plusieurs étapes sont nécessaires : un prétraitement (dégrillage et déshuilage) un traitement primaire, un traitement physico-chimique.

Le deuxième chapitre concerne à l'étude théorique des systèmes non linéaires basée sur les modèles flous de type Takagi-Sugeno. Un outil mathématique pour construire un modèle flou d'un système où les implications et le raisonnement flou sont utilisés est présenté dans ce chapitre. La prémisse d'une implication est la description du sous-espace flou d'entrée et de ses conséquences est une relation d'entrée-sortie linéaires.

Le troisième chapitre est consacré à la technique de modélisation utilisée est donnée par la méthode floue de Takagi-Sugeno afin de simuler les décisions d'un opérateur humain habile et expérimenté pour la détermination des quantités de PAC à ajouter aux eaux non traitées pour l'obtention d'une turbidité optimale.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion générale du travail développé et par quelques-unes prospectives qui nous semble les plus intéressantes à étudier.

CHAPITRE I : Le Traitement des eaux

I.1 Introduction

L'eau est indispensable à la vie humaine, végétale, industrielle, ou agricole, qui requièrent en abondance une bonne qualité de l'eau et malheureusement engendrent à travers ces diverses utilisations une pollution.

A cause des problèmes d'environnement liés à l'élévation de la population ainsi qu'au développement des activités industrielles, le phénomène naturel d'autoépuration ne peut pas à lui seul réaliser une diminution significative de la concentration des rejets d'effluents polluants; la qualité de l'eau s'est dégradée et par conséquent il s'en est suivi la perturbation de tout l'écosystème.

De ce fait, on utilise dans les stations d'épuration des traitements sous forme d'un ensemble de techniques afin de compléter les cycles naturels d'autoépuration. Nous tenterons, dans ce chapitre, de présenter quelques concepts fondamentaux liés à la pollution et les techniques utilisées pour le traitement d'une eau destinée à la consommation humaine.

L'épuration des eaux a pour objectif de réduire la charge polluante qu'elle véhicule, afin de rendre au milieu aquatique qui est le milieu récepteur une eau de qualité, respectueuse des équilibres naturels et de ses usages futurs. L'épuration des eaux passe par différentes étapes ; dont on va les présenter ci-dessous : Les prétraitements suivent des traitements primaires puis des traitements physico-chimiques.

I.2 Pollution des eaux

La pollution ou la contamination de l'eau peut être définie comme la dégradation de celle-ci en modifiant ses propriétés physique, chimique et biologique; par des déversements, rejets, dépôts directs ou indirects de corps étrangers ou de matières indésirables telles que les microorganismes, les produits toxiques, les déchets industriels [6].

Ces substances polluantes peuvent avoir différentes origines: Urbaine (activités domestiques; eaux d'égout, eaux de cuisine...) Agricole (engrais, pesticides) Industrielle (chimie, pharmacie, pétrochimie, raffinage...) La pollution est directement liée aux activités industrielles et agricoles. Nous nous intéressons aux rejets liquides transportés par l'eau, appelés couramment les eaux résiduaires industrielles transportant en général divers produits hautement toxiques avec des taux très élevés [6].

I.2.1 Définition des eaux résiduaires industrielles

Tous effluents ou rejets industriels obtenus lors de l'extraction et de la transformation des matières premières en produits industriels. Les eaux de rejets des services généraux des industries (sanitaire et cuisine) sont considérées également comme eaux résiduaires industrielles. [6],[7-9].

I.2.2 Origine des polluants et types de pollutions industrielles

Les eaux résiduaires industrielles sont spécifiques par leur volume et leur composition. On distingue trois types de pollution :

I.2.2.1 Pollution physique

C'est une pollution due aux agents physiques (tout élément solide entraîné par l'eau), elle est d'origine domestique, essentiellement industrielle. On peut la répartir en trois classes: mécanique, thermique et radioactive [6],[7],[11].

I.2.2.1.1 Pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les ERI, ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension MES [6].

I.2.2.1.2 Pollution thermique

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries, aciéries..); ont une température de l'ordre de (70 à 80) °C. Elle diminue jusqu' à (40 à 45) °C lorsqu'elle contacte les eaux des milieux aquatiques entraînant un réchauffement de l'eau, qui influe sur la solubilité de l'oxygène [6].

En outre tout changement de température cause des effets significatifs sur la survie des organismes aquatiques. Un abaissement important de température ralentit la plupart des réactions chimiques vitales voire les arrêter. Au contraire, des augmentations de température peuvent tuer certaines espèces, mais également favoriser le développement d'autres organismes causant ainsi un déséquilibre écologique [6],[7],[8].

I.2.2.1.3 Pollution radioactive

C'est celle occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets qui trouvent leur source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ces formes (installations et centrales d'exploitation de mine d'uranium, traitement des déchets radioactifs). Les éléments radioactifs s'incorporent dans les molécules des organismes vivants. Plus on s'élève dans la chaîne alimentaire plus les organismes sont sensibles aux rayonnements [7],[8],[6].

I.2.2.2 Pollution chimique

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories : Organiques (hydrocarbures, pesticides, détergents, phénols..) ; Minérales (métaux lourds, cyanure, azote, phosphore...) [6]

I.2.2.2.1 Pollution organique

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...). Ils provoquent une consommation d'oxygène dissous de ces eaux, en entraînant la mort des poissons par asphyxie et le développement (dépôts de matières organiques au fonds des rivières) de fermentation anaérobie (putréfaction) génératrices de nuisances olfactives. [8],[12],[6].

a. Hydrocarbures

La pollution par les hydrocarbures résulte de plusieurs activités liées à l'extraction du pétrole, à son transport et en aval à l'utilisation de produits finis (carburants et lubrifiants), ainsi qu'aux

rejets effectués par les navires (marées noires). Les effets des hydrocarbures dans le milieu marin sont considérables. Ils dépendent largement de leur composition. En fait leurs activités peuvent s'exercer selon plusieurs modalités très différentes. [13],[12],[6].

- **Toxicité aiguë:** elle s'exerce sur l'ensemble des êtres vivants du milieu (végétaux, animaux ou bactéries) provoquant des disparitions immédiate des poissons s'effectuent par colmatage des bronchites. Les oiseaux sont également tués en masses par engluage des plumes. On n'estime que 150 000 à 400 000 le nombre d'oiseaux tués annuellement par les hydrocarbures [13],[6].
- **Toxicité à long terme:** les hydrocarbures ou les produits de dégradation, peuvent être accumulés par les différents organismes marins, après leur ingestion, leurs effets peuvent s'étaler sur des périodes très longues. Ce danger est évidemment plus grave lorsqu'il s'agit des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HPA) cancérigènes (méthyle chlorolanthrène, benzanthracènes, benzopyrènes). Ils sont repris par les chaînes alimentaires et concentrées jusqu'à des taux très élevés. On imagine le danger que peut présenter ce phénomène pour le consommateur humain [6],[13].

b. Phénols

Ils désignent un ensemble de composés hydroxylés du benzène. La présence du phénol dans l'eau a pour origine les polluants industriels (usine chimique, cokeries, industries pétrochimique, raffineries...), ainsi que les revêtements bitumeux des canalisations et des réservoirs, la décomposition des produits végétaux et la dégradation des pesticides. Ces produits s'oxydent faiblement, se fixent peu, se filtrent facilement et ils sont souvent biodégradables; alors ils ne se trouvent qu'en faible quantité. Leur inconvénient principal est qu'ils donnent à l'eau un goût extrêmement désagréable et très persistant marqué de chlorophénol lorsqu'ils sont en présence de chlore. Les poissons, accumulent les phénols jusqu'à 30 mg/kg, ils sont alors impropres à la consommation. Les phénols peuvent être séparés des eaux résiduaires par extraction liquide-liquide, oxydé par le chlore ou l'ozone ou bien détruits par un traitement biologique [6],[14].

I.2.2.2.2 Pollution minérale

a. Métaux lourds

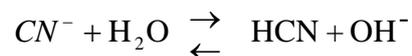
La présence des métaux lourds dans l'eau, l'atmosphère et par conséquent la chaîne alimentaire est le cas le plus intéressant parmi les problèmes posés à la pollution. Par ordre décroissant de toxicité spécifique. Les métaux sont classés comme suit: $Hg < Cr < Ti < Cu < Co < Ni < Pb < Zn$ [6]

Les métaux lourds sont susceptibles d'être métabolisés et concentrés par les organismes vivants et mis en circulation dans la chaîne alimentaire ou leur toxicité augmente. L'irréversibilité de cette pollution est préoccupante du fait qu'il est impossible de les récupérer, une fois dissipés dans la nature [6],[11],[15].

b. Cyanure

Les cyanures, c'est un poison à action rapide qui peut se rencontrer sous plusieurs formes, y compris les formes gazeuses, liquides et solides. Bien que les cyanures se rencontrent naturellement dans beaucoup d'aliments et de plantes [6].

L'industrie rejette d'autres composés cyanogènes (installation de cyanuration, galvanoplastie, traitement de minerais...). L'ion CN^- est toxique en raison de l'acide cyanhydrique qui se produit en présence d'eau selon l'équilibre [6]:



c. Pollution d'azote

Les activités industrielles, peuvent être à l'origine des rejets plus ou moins riches en azote (élément nutritif) issus des fabrications d'engrais, des cokeries, et des industries chimiques et agroalimentaires [6],[8]. L'azote existe sous deux formes: la forme réduite qui regroupe l'azote ammoniacal (NH_3 OU NH_4^+) et l'azote organique (protéine, créatine, acide urique). Plus une forme oxydée en ions nitrites (NO_2^- - NO_2^-) et nitrates (NO_3^-). [6]

d. Pollution par le phosphore

Le phosphore a pour origine les industries du traitement de surfaces des métaux, les laveries industrielles des fabrications, d'engrais agroalimentaire [6],[14].

Comme l'azote, le phosphore est un élément nutritif, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques [6],[8].

I.2.2.3 Pollution microbiologique

L'eau peut contenir des microorganismes pathogènes (virus, bactéries, parasites) ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (industrie, utilisation domestique...) [6],[16].

I.2.3 Paramètres de mesure de la pollution

L'estimation de la pollution industrielle est un problème complexe et délicat qui fait appel à des dosages et des tests de différents paramètres servant à caractériser de manière globale et pertinente le niveau de la pollution présente dans les effluents [6],[9],[16].

Parmi ces paramètres on cite les plus importants:

I.2.3.1 Paramètres organoleptiques

a. Couleur

La couleur des ERI est en général grise, signe de présence de matières organiques dissoutes, de MES, du fer ferrique précipité à l'état d'hydroxyde colloïdale, du fer ferreux lié à des complexes organiques et de divers colloïdes [6],[7],[16].

b. Odeur

Les ERI se caractérisent par une odeur de moisi. Toute odeur est signe de pollution qui est due à la présence de matières organiques en décomposition [6],[16].

I.2.3.2 Paramètres physiques

a. Température

Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier O_2) dans l'eau ainsi que, la détermination du pH et la vitesse des réactions chimiques. La température agit aussi comme facteur physiologique sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau [6],[16],[17].

b. Potentiel d'hydrogène

Sa valeur caractérise un grand nombre d'équilibre physicochimique. La valeur du *pH* altère la croissance des microorganismes existant dans l'eau (leur gamme de croissance est comprise entre 5 et 9) [6],[7],[17].

c. Turbidité

Elle caractérise le degré de non transparence de l'eau, elle traduit la présence des MES [6].

d. Matières en suspension

Ce paramètre exprimé en mg/l correspond à la pollution insoluble particulaire, c'est-à-dire la totalité des particules solides véhiculées par les ERI. Mesuré par peser après filtration ou centrifugation et séchage à 105°C. Les procédés de séparation par filtration font appel, soit à des disques en fibres de verre, soit à des couches d'amiante [6].

La méthode par centrifugation est plus particulièrement réservée au cas où les méthodes par filtration ne sont pas applicables par suite d'un risque élevé de colmatage des filtres [7],[10],[6].

I.2.3.3 Paramètres chimiques**a. Demande chimique en oxygène (DCO)**

C'est la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire qui correspond à la quantité des matières oxydables par oxygène renfermé dans un effluent. Elles représentent la plus part des composés organiques (détergents, matières fécales). Elle est mesurée par la consommation d'oxygène par une solution de dichromate de potassium en milieu sulfurique en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure II (complexant des chlorures), à chaud pendant 2h [6],[13],[14],[18],[19].

b. Demande biologique en oxygène (DBO5)

Exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques par les microorganismes du milieu. Mesurée par la consommation d'oxygène à 20°C à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablement ensemencé, temps qui assure l'oxydation biologique des matières organiques carbonées. L'épuration biologique aérobie complète d'une ERI exige en fait un temps de 21 jours (DBO_{21} dit ultime) nécessaire pour l'oxydation des composés azotés biodégradables, ou de 28 jours sinon 35 jours, qui représentent le temps de dégradation de certaines familles d'hydrocarbures.[6]

Le rapport DCO / DBO_5 est l'indice de la biodégradabilité d'une eau. Pour qu'une pollution soit dégradable le rapport est inférieur à 2,5 [6],[7],[14],[19].

La moyenne pondérée de la DCO et la DBO mesurée après décantation pendant 2h suivant la formule: $(DCO + 2DBO_5)/3$ correspond aux matières existantes MOX [6],[8].

c. Carbone total organique COT

Détermine des propriétés variables du carbone organique dissous et particulaire, du carbone organique provenant de substances volatils et du carbone minéral dissous. Sa mesure est réalisée par un analyseur de CO_2 à infrarouge après combustion catalytique à haute température de l'échantillon [6],[7],[13],[17].

d. Azote total NT

Exprimé en mg/l, ce paramètre devient de plus en plus important. Sa valeur globale dans les ERI recouvre toutes les formes déjà citées. C'est la somme d'azote des formes réduites (organiques et ammoniacal) est appelé azote de KJELDAL et l'azote des formes oxydées (NO_2^- , NO_3^-) [6],[7],[9].

e. Phosphore total PT

Le phosphore se trouve dans les ERI sous formes:

- D'orthophosphate, soluble PO_4H_2 ;
- De polyphosphate qui a tendance à s'hydrolyser en orthophosphate;
- De phosphore non dissous.

La somme de ces diverses formes constitue le phosphore total, dont chaque forme peut être mesurée indépendamment des autres par spectrométrie [6],[7].

I.2.3.4 Autres paramètres

a. Hydrocarbures

La mesure des hydrocarbures dans les ERI constitue une opération souvent délicate. En effet, l'échantillonnage est fréquemment hasardeux, particulièrement lorsque les ERI ne sont pas prélevées dans un réseau sous pression ou quand elles sont très chargées d'huiles. Par ailleurs, les valeurs obtenues lors du dosage réalisé sur un même échantillon est selon la méthode utilisée, car celle-ci se rapportent alors à la détection partielle ou totale de composés différents [6],[10].

b. Micropolluants

Le terme micropolluant désigne un ensemble de substance qui, en raison de leur toxicité, de leur persistance et de leur bioaccumulation sont de nature à engendrer des nuisances même lorsqu'elles sont rejetées en très faibles quantités [6],[10].

Les principaux micropolluants sont :

- Certains métaux lourds et métalloïdes (*Cd, Pb, Cr, Cu, ... Hg*);
- Composés phénoliques, organohalogéniques, organophosphorés, huilesminérales, Hydrocarbures aromatiques polycycliques;
- Certains dérivés nitrés [6],[7].

I.3 L'eau de surface

On peut répartir les eaux de surfaces en trois catégories : eaux de rivière (partie amont), eaux de rivière (partie aval) et eaux de lac [4].

I.3.1 Eaux de rivière (partie amont)

L'amont d'une rivière est en général situé dans une région montagneuse, où la densité de population est faible et les industries pratiquement inexistantes. Les principales caractéristiques de ces eaux sont présentées si dessous :

- ✓ Turbidité élevée. Le régime des rivières étant torrentiel les eaux transportent de grandes quantités de matières en suspension [4].
- ✓ Température froide. Ces eaux proviennent soit de sources, soit de la fonte des neiges et des glaciers [4].

I.3.2 Eaux de rivière (partie aval)

L'aval d'une rivière est en général situé dans une région où la population est dense, les eaux sont de moins bonne qualité et plus difficile à traiter. Les principales caractéristiques de ces eaux sont présentées si dessous :

- ✓ Contamination bactérienne élevée [4].
- ✓ Contamination organique et inorganique élevée [4].

I.4 Le traitement des eaux

L'eau de surface provenant de plusieurs origines est polluée donc impropre à la consommation. Pour pouvoir l'utiliser, l'eau doit subir un traitement pour la clarifier par

l'élimination des matières en suspension, ainsi que des matières colloïdales et des macromolécules susceptibles de communiquer à l'eau une turbidité ou une couleur indésirable [4].

I.4.1 Caractéristiques des matières polluantes

I.4.1.1 Matières en suspension

Ce sont des particules solides très fines qu'on peut voir à l'œil nu. Théoriquement, elles déterminent la turbidité de l'eau et limitent la pénétration de la lumière diminuant ainsi la teneur en oxygène dissous et nuisent au développement de la vie aquatique [4].

I.4.1.2 Matières colloïdales

Ce sont des substances en forme de colle ou de gel qui ont la capacité de rester en suspension. Cette caractéristique est due à leur structure moléculaire [4].

La décantation naturelle de ces matières est extrêmement lente. Il faut donc empêcher que ces matières soient solubles en utilisant un produit chimique pour faciliter leur élimination par décantation [4].

I.5 Les paramètres mesurables pour évaluer la qualité de l'eau

Les rejets dans les milieux naturels entraînent des déchets qui vont perturber le fonctionnement écologique et rendre l'eau trouble. Un traitement, par l'ajout d'un coagulant est nécessaire. La quantité de ce dernier est déterminée en fonction des mesures de certaines grandeurs responsables de la turbidité de l'eau. Ces grandeurs évoluent et varient en fonction des phénomènes de pollution, et aussi de saison à saison, et donc l'opération d'ajout du coagulant est critique et la décision est délicate. Parmi ces grandeurs on trouve [4] :

I.5.1 La température

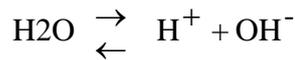
Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. Sachant que la température des eaux dépend de celle de l'air, de sa couleur ; une eau sombre absorbe plus fortement la chaleur. Les rejets domestiques et industriels élèvent généralement la température de l'eau. La mesure de la température est effectuée sur le terrain, en général faite à l'aide de plusieurs capteurs placés en différents endroits du bassin [4].

I.5.2 Le pH

L'eau contient des particules ionisées, qui résultent de la dissociation ionique de l'eau :

Les premières sont chargées positivement, par exemple H^+ : ion hydrogène (fonction acide) [4].

Les secondes sont chargées négativement, par exemple OH^- : ion alcalin (fonction basique) [4].



La dissociation augmente avec l'élévation de la température, et donc le pH diminue, de ce fait il est indispensable de mesurer la concentration des ions de l'eau, et de ce fait, il faut prendre des mesures du pH [4].

Le pH est mesuré selon une échelle qui va de 0 à 14 :

Une mesure inférieure à 7 signifie que l'eau est acide [4].

Une mesure supérieure à 7 signifie que l'eau est basique, ou alcaline [4].

I.5.3 L'alcalinité

C'est la mesure de la capacité d'une eau à neutraliser les acides, c'est à dire maintenir un pH constant [4].

I.5.4 La turbidité

Les matières dissoutes dans l'eau, telles que les algues, la boue, les microbes ou autres particules, absorbent et diffusent la lumière qui les traverse. Plus les particules sont nombreuses, plus le degré de turbidité augmente [4].

I.6 Les différents traitements du processus d'épuration d'eau

Dans les stations d'épuration de l'eau, on vise la production d'une eau potable à partir d'une eau brute plus ou moins polluée. Pour ce faire, on soumet cette eau brute à diverses étapes de traitement réalisées dans plusieurs unités de station d'épuration de l'eau. Et donc l'eau polluée doit subir divers traitements par un enchaînement successif.

I.6.1 Les prétraitements

Les prétraitements constituent l'ensemble des opérations physique et mécanique: dégrillage, dessablage et dégraissage-déshuilage. Ils dépendent de la nature et des caractéristiques des rejets industriels et de la ligne d'épuration prévue en aval.[6], [20-22].

I.6.1.1 Dégrillage

Il permet de filtrer les objets ou les débris les plus grossiers véhiculés par les eaux usées. Son principe consiste à faire passer l'eau brute à travers des grilles composées de barreaux placés verticalement ou inclinés de 60° à 80° sur l'horizontal [6],[22]. Le choix d'espacement des barreaux de la grille est défini par la taille et la nature des déchets acceptés par la STEP. Un espacement de 10mm (dégrillage fin) maximum est utilisé pour protéger les filières d'épuration des eaux ou des boues spécifiques (décantation lamellaire, centrifugation...). Plus communément, l'espacement des barreaux est de 2,0 à 2,50 cm pour un dégrilleur mécanique et 3 à 4 cm pour un dégrilleur manuel. La vitesse moyenne de passage de l'eau entre les barreaux est comprise entre 0,6 et 1 m/s. Les déchets récupérés sont compactés afin de réduire leur volume puis stockés dans une benne avant d'être envoyés vers une filière de traitement adapté [6],[23].

I.6.1.2 Dessablage

Les matières minérales grossières en suspension tels que les sables et les graviers, dont la vitesse de chute est inférieure à 0,3 m/s, susceptibles d'endommager les installations en aval, vont se déposer au fond d'un des sableurs par décantation. Il faut 60 secondes à l'eau pour traverser le tamis et éliminer 90% du sable qui ensuite est récupéré par un râteau mécanique et poussé dans un conteneur d'évacuation. [6],[23].

I.6.1.3 Déshuilage dégraissage

Le déshuilage est une extraction liquide-liquide tandis que le dégraissage est une extraction solide-liquide. On peut considérer que le déshuilage dégraissage se rapporte à l'extraction de toutes matières flottantes d'une densité inférieure à celle de l'eau. Ces matières sont de nature très diverses (huiles, hydrocarbures, graisses...). Elles peuvent former une émulsion stable entretenue par le brassage de l'eau ou constituer une phase indépendante non émulsionnée. Le déshuilage complet nécessite en fait un traitement en deux stades:

- Pré déshuilage, par opération physique gravitaire sans adjonction de réactifs, réduisant la teneur en HC à environ 15 à 100mg/l, il s'effectue par flottation naturelle des vésicules huileuses émulsionnées. Si l'émulsion n'est pas trop fine (particules supérieures à 50µm). Il est réalisé dans différents types d'appareils: déshuileurs longitudinaux conventionnels, à plaques parallèles et circulaires raclés.[6]

- Déshuileage final: flottation par air dissous où les bulles d'air augmentent la vitesse de remontée des particules grasses et des huiles lorsqu'elles ne sont pas émulsionnées, ou coagulation par sels métalliques ou par électrolytes permettant d'obtenir l'épuration complète [6],[22],[25].

I.6.2 Traitements primaires

Permet d'éliminer de l'eau plus de la moitié des matières en suspension sous forme de boues dites « boues primaires », recueillies ensuite par pompage de fond. Il fait appel à différents procédés physiques.

I.6.2.1 La décantation

La décantation consiste à laisser reposer un mélange hétérogène suffisamment longtemps pour que les particules solides en suspension tombent au fond du récipient. On peut ensuite verser délicatement dans un autre récipient le mélange qui surnage : on obtient un mélange quasiment homogène [26].

La décantation fonctionne particulièrement bien pour séparer des constituants qui tombent facilement au fond du liquide, comme le sable ou la boue. Elle est d'ailleurs utilisée lors du traitement des eaux usées [26].

La décantation est souvent très lente. Pour accélérer celle-ci, on peut utiliser une centrifugeuse ; en faisant tourner très rapidement le mélange hétérogène dans des tubes, les particules sont plaquées au fond de ceux-ci et séparées du liquide [26].

Pour séparer deux liquides non miscibles on utilise une ampoule à décanter. L'ampoule à décanter a la forme d'un entonnoir prolongé par un long tube étroit terminé par un robinet. Lors de la décantation, le liquide le plus dense se placera sous le liquide le moins dense. L'ouverture du robinet va permettre de séparer les deux liquides [26].

I.6.2.2 La filtration

Pour séparer les constituants d'un mélange hétérogène, on peut aussi effectuer une filtration. Pour cela, on peut utiliser une passoire assez fine ou du papier filtre (comme un filtre à café) pour retenir certains constituants du mélange. Le filtre retient les particules solides les plus grosses. Le liquide récupéré est appelé le filtrat. Le choix du filtre (passoire, papier filtre) doit être adapté à la taille des particules que l'on doit séparer. On utilise aussi la filtration pour le traitement des eaux usées [26].

I.6.2.3 La flottation

Une technique qui peut remplacer la sédimentation est la flottation. C'est un procédé de séparation liquide-solide basé sur la formation d'un ensemble appelé attelage, formé des particules à éliminer, plus léger que l'eau. Cette technique convient principalement pour éliminer les particules de diamètre compris entre 1 et 400 μm . Les solides sont transportés à la surface, fixés à des bulles, et sont ensuite écumés. Cette méthode permet d'éliminer des particules plus petites qu'avec la sédimentation. Elle convient davantage aux eaux présentant une haute teneur en algues, une faible turbidité naturelle ou une forte coloration.[6]

La flottation n'est pas aussi efficace que la sédimentation pour éliminer les particules et réduire la turbidité. Ce procédé est sensible à la température et affiche un piètre (négligeable) rendement par temps très froid [6],[27],[28],[29].

I.6.2.3.1 Types des procédés de flottation

On distingue quelques types de flottation, parmi les quels on cite :

a. Flottation naturelle : lorsque la masse volumique des particules à éliminer est inférieure à celle de l'eau [6].

b. Flottation mécanique : consiste en une dispersion mécanique de bulles d'air de 0,1 à 1 mm de diamètre. Il est surtout utilisé pour la séparation et la concentration par moussage des minerais [6].

c. Flottation par insufflation d'air : c'est une flottation naturelle améliorée par l'insufflation au sein de la masse liquide de bulles d'air de quelques diamètres, on utilise pour cela des pompes poreuses [6].

d. Flottation par air dissous ou aéro flottation : on produit des microbulles au sein du liquide de 40 à 70 microns de diamètre, à détendre ensuite brutalement cette eau, par retour à la pression atmosphérique pour provoquer l'apparition spontanée d'un véritable "lait de micro bulles", qui, mélangé aux matières en suspension préalablement coagulées ou flocculées provoquera leur flottation [6].

e. Electro flottation : c'est une technique de séparation analogue à l'aéro flottation, mais à la différence que les micros bulles sont produites par électrolyse de l'eau à traiter au moyen d'électrodes appropriées. Ce procédé présente l'intérêt d'assurer l'homogénéité du flux tant

du point de vue de la dimension (100 microns) des bulles que de leur répartition spatiale. [6],[27],[28],[29].

I.6.3 Les traitements physico-chimiques

Si la décantation se faisait directement après le prélèvement dans le milieu aquatique, le temps de décantation d'un gravier dans un mètre d'eau serait d'une seconde par la seule influence de son poids, on passerait à 2 minutes pour le sable fin, à 2 heures pour l'argile, à 8 jours pour une bactérie et de 2 à 200 ans pour un colloïde. Ces durées étant bien évidemment beaucoup trop grandes. Les colloïdes peuvent même traverser un filtre très fin, ils sont les principales causes de la turbidité et la couleur d'une eau [6],[30].

I.6.3.1 Élimination de la pollution colloïdale

Ce traitement consiste à enlever la stabilité aux matières colloïdales présentes dans l'eau en provoquant la neutralisation de leurs charges électriques superficielles. L'agglomération de ces particules permet de former un flocon volumineux qui peut se décanter facilement. Ce flocon est appelé floc [4].

La première étape est appelée coagulation et se réalise dans le traitement d'eau par l'utilisation d'un produit chimique appelé polychlorure basic d'aluminium.

La deuxième étape est la floculation [4].

Nous nous intéressons dans ce travail à la première étape pour introduire la quantité nécessaire qu'il faut rajouter à l'eau en imitant les actions de l'opérateur humain [4].

I.6.3.2 Coagulation

Le mot coagulation vient du latin *coagulare* qui signifie « agglomérer ». La coagulation consiste à ajouter à l'eau un réactif permettant la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives qui sont à l'origine du maintien en suspension stable. Il faut noter que la coagulation n'est correcte qu'à l'intérieur d'une zone de *pH* bien déterminée (un *pH* supérieur à 4 pour les chlorure de fer et un *pH* compris entre 6 et 7 pour le sulfate d'aluminium); elle demande aussi une dispersion immédiate du coagulant dans l'eau afin que les charges électriques des colloïdes soient déchargés uniformément, cela permet aux particules de s'agglomérer et de décanter plus rapidement [6].

I.6.3.2.1 Coagulants utilisés

Les principaux coagulant utilisés pour déstabiliser les particules et pour produire un floc sont à base d'aluminium et de fer. La réaction des sels de ces métaux avec l'eau engendre un ensemble de produits complexes qui, par différents moyens déstabilisent les particules colloïdales et favorisent leur agglomération [4].

Tout coagulant mis en solution consomme de l'alcalinité, cette perte est fonction de la nature et de la concentration du composé mis en jeu [4].

Cette perte d'alcalinité se traduit par une chute de pH , donc par une acidification de l'eau.

Parmi ces coagulants il y a le polychlorure basic d'aluminium (*PAC*) qui est fabriqué à partir de chlorure d'aluminium et de soude [4].

I.6.3.2.2 L'effet des différents paramètres sur la coagulation

La coagulation est l'étape la plus essentielle et la plus délicate dans la chaîne de traitement des eaux, la détermination de la quantité à ajouter à l'eau usée est critique afin d'avoir une eau pure [4].

Les coagulants agissent en créant une réaction chimique et en éliminant les charges négatives qui font que les particules se repoussent entre elles [4].

Le mélange coagulant-eau est remué lentement et la floculation a lieu. Le fait de battre l'eau favorise la coagulation de minuscules particules en suspension et forme des grumeaux plus grands et plus faciles à retirer, les «flocs» [4].

Pour cela il est nécessaire de connaître la quantité qu'il faut mettre par rapport aux différents paramètres qui évaluent la qualité de l'eau, tel que la température, le pH , l'alcalinité, ainsi que la turbidité qui nécessite la présence d'un contrôleur afin de bien l'évaluer [4].

I.6.3.2.2.1 Effet de la température

La variation de la température de l'eau entraîne plusieurs situations dont lesquelles la quantité du coagulant nécessaire est différente. Toutefois, l'expérience révèle que durant l'hiver lorsque la température de l'eau est très faible, le floc se décante plus difficilement et a tendance à pénétrer plus profondément dans les filtres.

Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité et rétrécit la plage optimale du pH , ce qui explique la difficulté de décantation du floc. Alors il

faut augmenter la quantité du coagulant, ce qui a pour effet d'accroître la probabilité de collision entre les particules et d'élargir la plage optimale du pH .

I.6.3.2.2 Effet du pH

Le pH est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle, la coagulation aura lieu rapidement, selon le coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Lorsque la coagulation se produit hors de cette plage optimale, il faut, soit augmenter la quantité du coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité. Pour les sels d'aluminium et de fer, les plages de pH optimales s'étendent respectivement de 5 à 7 et de 4 à 6.

I.6.3.2.3 Effet de la turbidité

La turbidité provient de la présence des particules colloïdales de glaise, qui sont de grosses particules qui peuvent se déposer naturellement. Le diamètre de ces particules est de l'ordre de $1 \sim m$. La coagulation de ces particules est assez facile lorsqu'on maintient le pH dans sa plage optimale.

Il faut ajouter une concentration minimale de coagulant pour obtenir une certaine quantité de floc.

Lorsque la turbidité augmente, il faut augmenter la concentration du coagulant. Lorsque la turbidité est très élevée, la quantité de coagulant nécessaire est relativement faible, car la probabilité de collision entre les particules est très élevée. Par contre, lorsque la turbidité est faible. La coagulation est difficile.

Lorsque la turbidité est due à des particules de diamètres variés, il est plus facile d'effectuer la coagulation que lorsqu'elle est imputable à des particules de diamètres sensiblement égaux.

La coagulation d'une faible concentration de particules de glaise dépend principalement du coagulant et de la composition chimique de l'eau.

I.6.3.3 Flocculation

La flocculation est le processus de grossissement et d'uniformisation des petits flocons formés lors de l'introduction du coagulant. Elle a pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules colloïdales déstabilisées et leur agglomération, pour accroître son volume, sa masse et sa cohésion. Une bonne flocculation est favorisée par:

- Une coagulation préalable aussi parfaite que possible;
- Une augmentation de la quantité du floc dans l'eau;
- Un brassage homogène et lent pour tout le volume d'eau;
- L'emploi de certains produits appelés flocculants ou adjuvants de coagulation [6],[21],[31].

On distingue trois types de flocculation selon le type de mouvement qui anime les particules dans la suspension:

a. Flocculation rapide ou pré cinétique (mouvement brownien):

Les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celles-ci, dit mouvement brownien qui est fonction de la température de l'eau [32],[33].

b. Flocculation lente ou ortho cinétique (brassage mécanique):

C'est la flocculation provoquée par l'agitation de l'eau. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules [32],[33].

c. Flocculation par entraînement:

Elle se produit dans une solution qui décante quand les grosses particules, tombant plus vite, entraînant les plus petites avec eux [34].

I.6.3.4 Décantation

La décantation est utilisée dans pratiquement toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux, c'est un procédé de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc dont la densité est supérieure à celle de l'eau ; elle s'effectue selon un processus dynamique, en assurant la séparation des deux phases solide-liquide de façon continue. Les particules décantées s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite clarifiée. Elle est dirigée vers un autre stade d'épuration. La décantation à un rôle épuratoire non négligeable [6].

I.6.3.4.1 Types de décantation

Le phénomène de sédimentation peut se manifester différemment selon la concentration de la suspension, les caractéristiques propres des particules et les interactions possibles entre elles. On distingue quatre types de décantation [6]:

a. Décantation de particules discrètes : Elle est caractérisée par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute [6].

b. Décantation de particules floculantes : Elle est caractérisée par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Leurs propriétés physiques sont donc modifiées pendant le processus [6].

c. Décantation freinée : Ce processus de sédimentation se produit pour des concentrations en matières solides floculées supérieures à 500 mg/l par suite d'interférence mutuelle entre les particules et la vitesse ascensionnelle du fluide déplacé au cours de la décantation. Ce qui entraîne la formation d'une couche de particules et par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant [6].

d. Décantation en compression de boues : Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures. Dans cette zone, le phénomène de consolidation est relativement lent. On retrouve ce type de décantation dans les épaisseurs de boues gravité [6],[35],[36],[27-37]

I.7 CONCLUSION

Pour la première partie le traitement des eaux est un domaine vaste, qui englobe plusieurs disciplines, comme la microbiologie, le génie des procédés et l'automatique. La pollution des ressources en eau dans les stations d'épuration provient de différentes origines, notamment des activités humaines au niveau domestique, agricole et industrielle. Nous avons commencé par une description des diverses sources de pollution ainsi que les indicateurs de quantités de l'eau. Nous avons fait une description globale de trois filières de traitement en mentionnant les différentes étapes d'une chaîne de dépollution. En effet étant donné la grande diversité de déchets les eaux brutes sont soumises à une combinaison ou une succession de différents processus de purification, de nature variée : physique, chimique. Nous avons détaillé, les trois types de traitement (le prétraitement, Le traitement primaire, le traitement physico-chimique) sur lequel porte spécifiquement notre étude, compte tenu de l'efficacité montré pour ce type de traitement pour restaurer la qualité de l'eau en dégradant principalement les matières organiques. Nous avons décrit, la filière de traitement est constituée de différents modules ou les eaux brutes sont soumises à une combinaison ou une succession de différents processus de purification. Nous avons vu que l'épuration d'un effluent pollué peut comporter les trois phases principales :

Le prétraitement : est un traitement préliminaire comportant un certain nombre d'opérations à caractère mécanique (procédés physiques). Le but est d'extraire de l'eau les gros déchets en suspension ou en flottation (sables, huiles) qui pourraient gêner les traitements subséquents. L'élimination préalable de ces matières permet d'éviter des effets nocifs secondaires (odeurs, colmatage...). Parmi ces méthodes de séparation primaires, les plus courantes sont :

- le dégrillage, qui a pour fonction la suppression des déchets les plus grossiers par passage à travers une grille.
- le dessablage, qui permet le dépôt du sable et des graviers susceptibles d'endommager les machines de pompage.
- le déshuilage, qui favorise, par injection d'air, la flottation des graisses et des hydrocarbures qui sont séparés par raclage de surface.

Le traitement primaire : permet d'éliminer de l'eau plus de la moitié des matières en suspension sous forme de boues dites « boues primaires », recueillies ensuite par pompage de fond. Il fait appel à différents procédés physiques :

- La flottation, visant à séparer les phases solides des phases liquides par la poussée d'Archimède. En flottation naturelle, les floccs de faible densité remontent librement à la surface. La flottation assistée s'obtient par injection d'air.
- La décantation, permet aux matières en suspension de se déposer, sous forme de boues, en utilisant la force de gravité pour séparer les particules de densité supérieure à celle du liquide.
- La filtration, est le passage du mélange liquide-solide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les solides et laisse passer les liquides.

Les traitements physico-chimiques : qui consistent à transformer chimiquement, à l'aide de réactifs, les éléments polluants non touchés par les traitements biologiques (matières non biodégradables). Il fait appel à différents procédés physico-chimique :

- La coagulation, est la déstabilisation de particules colloïdales par addition d'un réactif chimique appelé coagulant.
- La floculation, est l'agglomération de particules déstabilisées en micro floc et ensuite en flocons plus volumineux que l'on appelle floccs. On peut rajouter un autre réactif appelé floculant ou adjuvant de floculation pour faciliter la formation de floccs.
- La décantation, c'est la séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-floculation. Cette technique est très répandue dans les usines d'épuration et de traitement des eaux.

CHAPITRE II : La Modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons le problème d'identification (construction) des modèles flous à partir de données entrée/sortie. Nous introduisons la modélisation floue de systèmes modélisé dans un sens général se rapporte à établir la description d'un système en termes mathématiques c'est-à-dire donner le modèle mathématique du système physique.

Le développement de modèles mathématiques des systèmes est un sujet central dans plusieurs disciplines des sciences et de l'ingénierie. Traditionnellement, la modélisation est vue comme la double conjonction entre la compréhension de la nature et du comportement d'un système ainsi que le traitement mathématique approprié qui conduise à l'obtention d'un modèle utilisable [4].

Néanmoins, le besoin d'une forte compréhension des éléments physiques de base constitue une grande restriction au niveau pratique quand on est confronté aux systèmes complexes et/ou pauvrement compris, ce qui nécessite alors une modélisation qui consiste à proposer la structure appropriée pour l'approximateur et d'estimer les paramètres du modèle, en utilisant habituellement des données entrée-sortie représentatives du comportement, afin de capturer correctement les dynamiques et la non linéarité du système [4].

En nous focalisant particulièrement sur le modèle de type Takagi-Sugeno. En utilisant ce formalisme, nous représentons le comportement non linéaire d'un système par une composition de règles du type « Si-Alors ». Pour l'identification d'un tel système utilisant les entrées/ sorties linéaire paramétrique de tels modèles nous abordons une identification des paramètres de ce modèle flou qui est divisée en deux parties :

1. Identification de la structure du modèle flou.
2. Identification des paramètres du modèle flou.

II.2 Logique classique et logique floue

Dans la logique classique, les variables gérées sont Booléennes. C'est à dire qu'elles ne prennent que deux valeurs 0 ou 1. La logique floue a pour but de raisonner à partir de connaissances imparfaites qui opposent résistance à la logique classique. Pour cela la logique floue se propose de remplacer les variables booléennes par des variables flous [1].

II.2.1 Historique et définition

Depuis longtemps l'homme recherche à maîtriser les incertitudes et les imperfections inhérentes à sa nature. La première réelle manifestation de la volonté de formaliser la prise en compte des connaissances incertaines fut le développement de la théorie des probabilités à partir du XVII siècle. Mais les probabilités ne peuvent maîtriser les incertitudes psychologiques et linguistiques. Puis la logique floue est apparue en 1965 à Berkeley dans le laboratoire de Lotfi Zadeh avec la théorie des sous-ensembles flous puis en 1978 avec la théorie des possibilités. Ces deux théories constituent aujourd'hui ce que l'on appelle Logique Floue [1].

La logique floue permet la formalisation des imprécisions dues à une connaissance globale d'un système très complexe et l'expression du comportement d'un système par des mots. Elle permet donc la standardisation de la description d'un système et du traitement de données aussi bien numériques qu'exprimées symboliquement par des qualifications linguistiques [1].

II.3 Sous ensembles floues

Dans la théorie ensembliste classique, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble est définie par une valeur logique standard : 1 si l'élément appartient au sous-ensemble, 0 sinon.

Dans la théorie floue, un élément peut appartenir en partie à un sous-ensemble : son degré d'appartenance est décrit par une valeur comprise entre 0 et 1 [1].

II.3.1 Définition

Un sous-ensemble flou A dans un univers du discours X est caractérisé par sa fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui associe à chaque élément x de X une valeur dans l'intervalle des nombres réels [1] : $[0,1] : \mu_A \rightarrow X[0,1]$ (2.1)

Ainsi un sous-ensemble flou A dans X peut être représenté par un ensemble de couples ordonnés [1].

$$A = \{(x, \sim_A(x)) / x \in X\} \quad (2.2)$$

II.3.2 Opérations de base sur les sous ensembles floues

Supposons que A et B sont deux sous-ensembles flous définis dans un univers du discours X par les fonctions d'appartenance \sim_A et \sim_B . On peut définir des opérations ensemblistes telles que l'inclusion, l'intersection, l'union et le complément grâce à des opérations sur les fonctions d'appartenance [1].

Inclusion : A est dit inclus dans B , propriété que l'on note $A \subseteq B$, si tout élément x de X qui appartient à A appartient aussi à B avec un degré au moins aussi grand [1]:

$$\forall x \in X : \sim_A(x) \subseteq \sim_B(x) \quad (2.3)$$

Intersection : L'intersection de A et B , que l'on note $A \cap B$, est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus petit des deux degrés d'appartenance \sim_A et \sim_B [1]:

$$\forall x \in X : \sim_{A \cap B} = \min(\sim_A(x), \sim_B(x)) \quad (2.4)$$

Union : l'union de A et B , que l'on note $A \cup B$, est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus grand des deux degrés d'appartenance \sim_A et \sim_B [1]:

$$\forall x \in X : \sim_{A \cup B} = \max(\sim_A(x), \sim_B(x)) \quad (2.5)$$

Complément : Le complément de A , que l'on note A^c , est le sous-ensemble flou de X constitué des éléments x lui appartenant d'autant plus qu'ils appartiennent peu à A [1]:

$$\forall x \in X : \sim_{A^c} = 1 - \sim_A(x) \quad (2.6)$$

II.4 Le contrôleur à logique flou

Les systèmes d'inférence floue aussi connu comme systèmes basés sur des règles floue ou des modèles flous sont schématiquement présentés dans la figure 2.1.

Elles sont composées de 5 bloc classique: une règle-base contenant un certain nombre de règles flous si-alors, une base de données qui définit les fonctions d'appartenance des ensembles flous utilisés dans les règles floues, une unité qui la prise de décision effectue les opérations d'inférence sur les règles, une interface de fuzzification qui transforment les

entrées des floues en degrés de correspondance avec des valeurs linguistiques une interface defuzzification qui transforment les résultats flous de l'inférence dans une sortie floues [3].

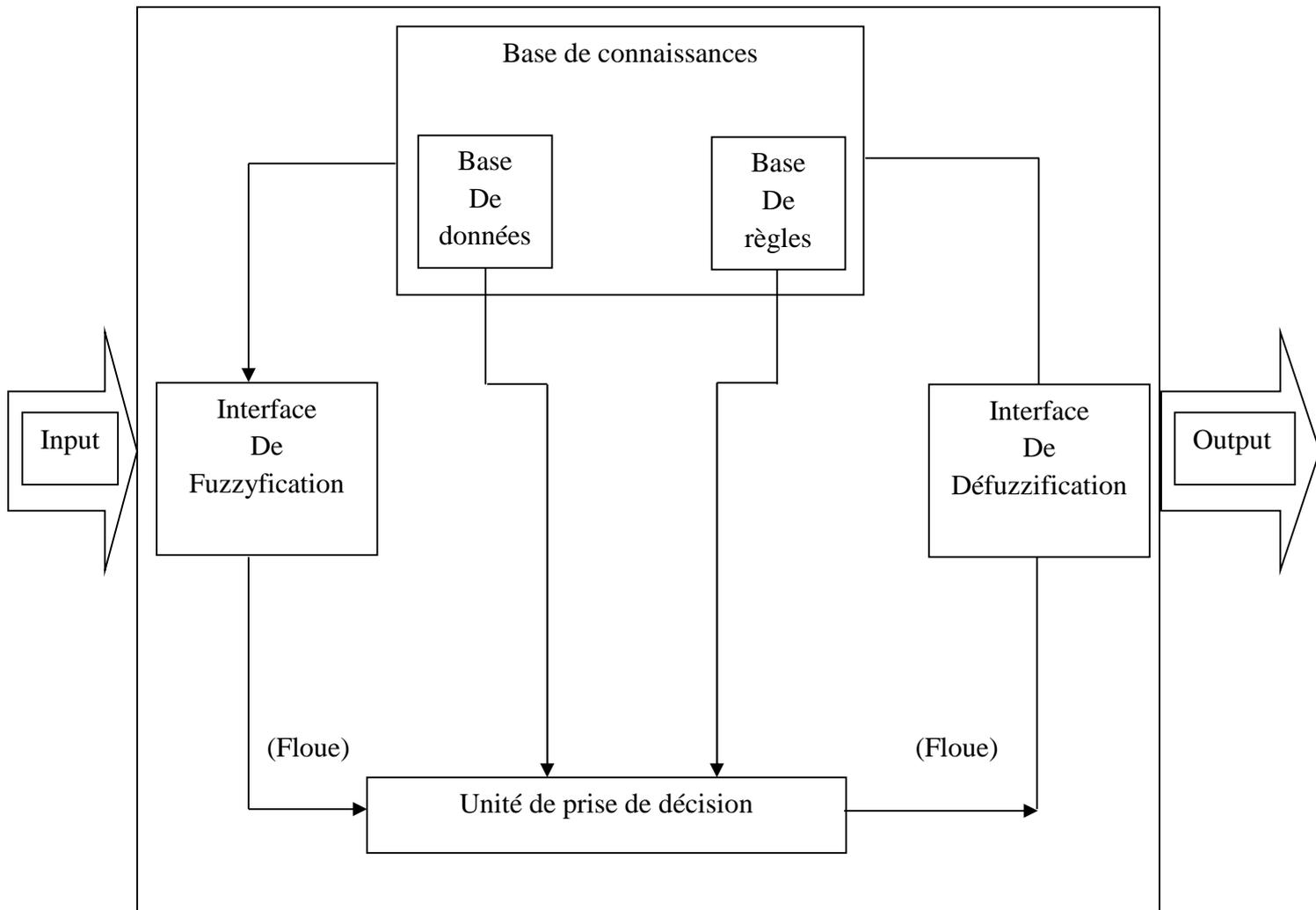


Figure II.1 : Système d'inférence floue.

II.4.1 Variables linguistiques

Une variable linguistique est caractérisée par un quintuple $(V, T(V), X, G, M)$, dans lequel :

– V est le nom de la variable définie sur l'univers du discours X [1].

– $T(V) = A_1, A_2, \dots, A_n$ est un ensemble des termes linguistiques qui sont des nombres flous, définissant des restrictions sur les valeurs que prend V dans X [1].

– G est un ensemble de règles syntaxiques qui permettent de former d'autres termes linguistiques à partir de $T(V)$. On les appelle modificateurs linguistiques. Par exemple, pour définir la fonction d'appartenance du terme linguistique «pas A» on utilise l'expression [1]

$$\sim_{pas(A)} = 1 - \sim_A \quad (2.7)$$

– M est l'ensemble des règles sémantiques qui permettent de définir les termes linguistiques [1].

II.4.2 Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert [1].

Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple. On peut choisir comme univers du discours un intervalle centré sur zéro : $[-c,+c]$. Si la mesure initiale x est comprise dans un autre intervalle $[a,b]$, la normalisation est souvent réalisée par transformation linéaire, selon [1]:

$$y = 2 * c * (x - (a + b)/2) / (b - a) \quad (2.8)$$

L'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique, qui comporte un nombre assez restreint de termes (en général trois, cinq ou sept) de façon à limiter le nombre de règles [1].

Enfin, les valeurs normalisées déduites de chacune des entrées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant les variables linguistiques correspondantes [1].

II.4.3 Règles floues

Les règles floues permettent de déduire des connaissances concernant l'état du système en fonction des qualifications linguistiques fournies par l'étape de fuzzification. Ces connaissances sont également des qualifications linguistiques [1].

Habituellement, les règles floues sont déduites des expériences acquises par les opérateurs ou les experts. Ces connaissances sont traduites en règles simples pouvant être utilisées dans un processus d'inférence floue. Par exemple, si un expert exprime la règle «si la température de l'eau est chaude, il faut ajouter de l'eau froide», le système utilisera une règle du genre «si p alors q» [1].

II.4.4 Inférence floue

L'inférence floue est une relation floue définie entre deux sous-ensembles. La définition de la relation peut théoriquement faire intervenir n'importe quel opérateur de combinaison. Pourtant, on utilise souvent les inférences floues définies par Mamdani et Sugeno [1].

II.4.4.1 Inférence floue de Mamdani

Supposons que la base de connaissances est constituée de n règles d'inférence contenant chacune m prémisses et une conclusion. Le processus d'inférence peut être décrit par le schéma suivant [1]:

Règle 1 : Si $(x_1 \text{ est } A_{11})$ et ... et $(x_1 \text{ est } A_{1m})$; alors $(Y \text{ est } B_1)$

Règle 2 : Si $(x_1 \text{ est } A_{21})$ et ... et $(x_1 \text{ est } A_{2m})$; alors $(Y \text{ est } B_2)$

Règle n : Si $(x_1 \text{ est } A_{n1})$ et ... et $(x_1 \text{ est } A_{nm})$; alors $(Y \text{ est } B_n)$

Dans lequel x_1, \dots, x_m sont des éléments des univers du discours X_1, \dots, X_m et A_{ji} , ($j = 1, \dots, m$), sont des quantités floues sur l'univers du discours X_i , et

B_j , ($j = 1, \dots, m$), sont également des quantités floues sur l'univers du discours Y [1].

Afin de définir une seule prémisse pour une règle i, les propositions $\langle\langle x_j \text{ est } A_{ij} \rangle\rangle$, ($j = 1, \dots, m$), sont combinées par l'opérateur minimum. La fonction d'appartenance de cette prémisse unique est donc donnée par [1]:

$$\sim_{R_{A_i}}(x_1, \dots, x_m) = \sim_{A_{i1}}(x_1) \wedge \dots \wedge \sim_{A_{im}}(x_m) \quad (2.9)$$

II.4.4.2 Inférence floue de Sugeno

Sugeno a proposé une méthode d'inférence floue qui garantit la continuité de la sortie. Cette méthode d'inférence s'avère très efficace dans des applications faisant intervenir à la fois des techniques linéaires, d'optimisation et adaptatives. Dans l'inférence de Sugeno, les règles floues sont exprimées de la façon suivante :

Règle i : Si Si $(x_1 \text{ est } A_{i1})$ et ... et $(x_m \text{ est } A_{im})$; alors $y = f_i(x_1, \dots, x_m)$

Dans laquelle x_1, \dots, x_m et y sont des éléments des universs du discours X_1, \dots, X_m et A_{i1}, \dots, A_{im} sont des termes linguistiques sur ces mêmes universs du discours. y est une fonction de x_1, \dots, x_m [1].

Par rapport à l'inférence de Sugeno, celle de Mamdani est plus intuitive, plus générale et elle s'adapte particulièrement bien à l'utilisation de connaissances issues d'une expertise humaine [1].

II.4.5 Defuzzification

La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [1].

Il y'a plusieurs méthodes de défuzzification, la plus utilisé est la règle de centre de gravité :

$$y_{cg} = \left(\sum_{i=1}^m \sim_{R_i} * y_i \right) / \sum_{i=1}^m \sim_{R_i} \tag{2.10}$$

II.4.6 Schéma d'une commande floue

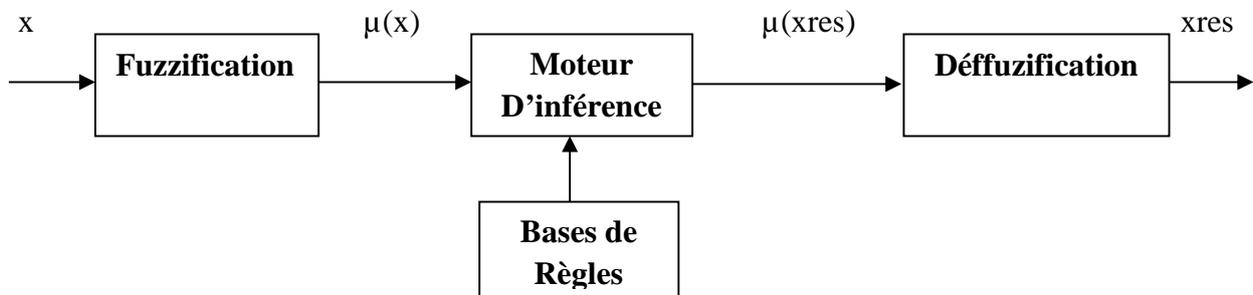


Figure II.2 Schéma d'une commande floue

La mise en œuvre d'une commande floue fait apparaître trois grands modules. Le premier module traite les entrées du système (valeurs réglant). On définit tout d'abord un univers de discours, un partitionnement de cet univers en classes pour chaque entrée, et des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées (par exemple pression grande, petite, faible et

changement d'écart mesure consigne de débit de matériau sortant d'une trémie très élevé, élevé, moyen, négatif, très négatif) [1].

La première étape, appelée fuzzification, consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps t , sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous ensemble floue [1].

Le deuxième module consiste en l'application de règles de type «si l'écart de température est grand, diminué le débit du fuel», ces règles vont, comme dans l'exemple introductif, permettre de passer d'un degré d'appartenance d'une grandeur réglante au degré d'appartenance d'une commande, ce module est constitué d'une base de règles et d'un moteur d'inférence qui permet le calcul [1].

Le troisième et le dernier module décrit l'étape de défuzzification qui est la transformation inverse de la première. Il permet de passer d'un degré d'appartenance d'une commande à la détermination de la valeur à donner à cette commande [1].

II.5 Modélisation floue type Takagi-Sugeno

II.5.1 Le modèle flou type Takagi-Sugeno

Un autre type de modèle flou, approprié pour l'approximation d'une classe générale de systèmes non linéaires est celui proposé par Takagi et Sugeno. Ce type de modèle est, comme celui de Mamdani, construit à partir d'une base de règles « Si...Alors... », Dans laquelle si la prémisse est toujours exprimé linguistiquement, le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques.

Le conséquent peut s'exprimer par exemple, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à l'antécédent [38].

II.5.2 Format d'implication floue type Takagi-Sugeno

Nous notons la fonction d'appartenance d'un ensemble flou A comme (x) , $x \in X$. Tous les ensembles flous sont associés avec les fonctions d'appartenance linéaires. Ainsi, une fonction d'appartenance est caractérisée par deux paramètres donnant le plus grand grade 1 et le plus petit grade 0. La valeur de vérité d'une proposition " x est A et y est B " est exprimé par : $|x \text{ est } A \text{ et } y \text{ est } B| = A(x) \wedge B(y)$. [39]

D'une manière générale, un modèle de type Takagi-Sugeno (TS) est basé sur une collection des règles R_i du type [39]:

$$R_i: \text{Si } x \text{ est } A_i \text{ Alors } y_i = f_i(x), i = 1, \dots, r \quad (2.11)$$

Où R_i dénote la i – ème règle du modèle est r est le nombre de règles que contient la base de règles. $x \in \mathfrak{R}^n$ Est la variable d'entrée (antécédent) et $y \in \mathfrak{R}$ est la variable de sortie (conséquent). A_i Est le sous-ensemble flou de l'antécédent de l' i – ème règle, définie, dans ce cas, par une fonction d'appartenance (multi variable) de la forme [39]:

$$\mu_{A_i}(x): \mathfrak{R}^p \rightarrow [0,1] \quad (2.12)$$

Comme dans le modèle linguistique, la proposition de l'antécédent " $x \text{ est } A_i$ " est normalement exprimée une combinaison logique de proposition simples avec des sous-ensembles flous unidimensionnels définis pour les composants individuels du vecteur, usuellement dans la forme conjonctive suivante [39]:

$$R_i: \text{Si } x_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } \dots \text{ et } x_p \text{ est } A_{ip} \text{ Alors } y = g(x_1, \dots, x_k); y_i = f_i(x), i = 1, \dots, r \quad (2.13)$$

y Variables de la conséquence dont la valeur est l'implication présumées.

$x_1 - x_k$ Variables de la prémisse qui apparaît aussi dans la partie de la suite.

$A_1 - A_k$ Ensembles flous avec des fonctions d'appartenance linéaire représentant un sous-espace flou dans lequel l'implication R peut être appliqué pour le raisonnement.

f Fonctions logique relie les propositions de la prémisse.

g Fonctions qui implique la valeur de g .

Dans la prémisse si A_i est égal à X_i pour un certain i où X_i est l'univers du discours de x_i est non conditionné [39].

Dans la suite nous ne allons utiliser «*et*» connecteurs dans le principe et adopter une fonction de la conséquence. Donc une implication est écrite comme [39]:

$$R_i: \text{Si } x_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } \dots \text{ et } x_p \text{ est } A_{ip} \text{ Alors } y_i = p_0 + p_1 x_1 + \dots + p_k x_k. \quad (2.14)$$

II.5.3 Raisonnement flou type Takagi-Sugeno

Supposons que nous ayons les implications $R^i = (i = 1, \dots, n)$ de la disposition ci-dessus. Quand on nous donne : $(x_1 = x_1^0, \dots, x_k = x_k^0)$, la valeur y est déduite dans les étapes suivantes [39]:

- 1) Pour chaque implication R^i , y^i est calculé par la fonction g^i en implication :

$$\begin{aligned} y^i &= g^i(x_k^0, \dots, x_k^0) \\ &= p_k^i + p_1^i x_1^0, \dots, + p_k^i x_k^0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

- 2) La valeur de vérité de la proposition $y = y^i$ est calculée par l'équation

$$\begin{aligned} |y = y^i| &= |x_1^0 \text{ est } A_1^i \text{ et } \dots \text{ et } x_k^0 \text{ est } A_k^i| \wedge |R^i| \\ &= (A_1^i(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_k^i(x_k^0)) \wedge |R^i| \end{aligned} \quad (2.16)$$

Où $| |$ signifie la valeur de vérité de la proposition et se tient pour le fonctionnement, et $|x^0 \text{ est } A| = A(x^0)$, c'est-à-dire, la noté de la composition du x^0 .

Pour simplifier, nous supposons

$$|R^i| = 1 \quad (2.17)$$

Donc la valeur de vérité de la suite obtenue est

$$|y = y^i| = A_1^i(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_k^i(x_k^0) \quad (2.18)$$

- 3) Le résultat final y déduit n implications est donnée que la moyenne de tous y^i avec les Poids $|y = y^i|$;

$$y = \frac{\sum |y=y^i| y^i}{\sum |y=y^i|} \quad (2.19)$$

II.6 Identification du modèle flou de type Takagi-Sugeno

Comme cela a été, nous considérons un modèle flou constitué de certains nombre de conséquences qui sont u format :

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } \dots \text{ et } x_k \text{ est } A_k \text{ alors } y = p_0 + p_1 x_1 + \dots + p_k x_k$$

Caractérisé par "et" conjonctif et une équation linéaire [39].

Pour l'identification, nous devons déterminer les trois articles suivants en utilisant les données d'entrée-sortie d'un système objectif [39].

- 1) x_1, \dots, x_k Les variables qui composent les prémisses de conséquences.
- 2) A_1, \dots, A_k Fonctions d'appartenance des ensembles flous dans les prémisses, en abrégé les paramètres de la prémisse.
- 3) p_1, \dots, p_k Les paramètres dans les conséquences.

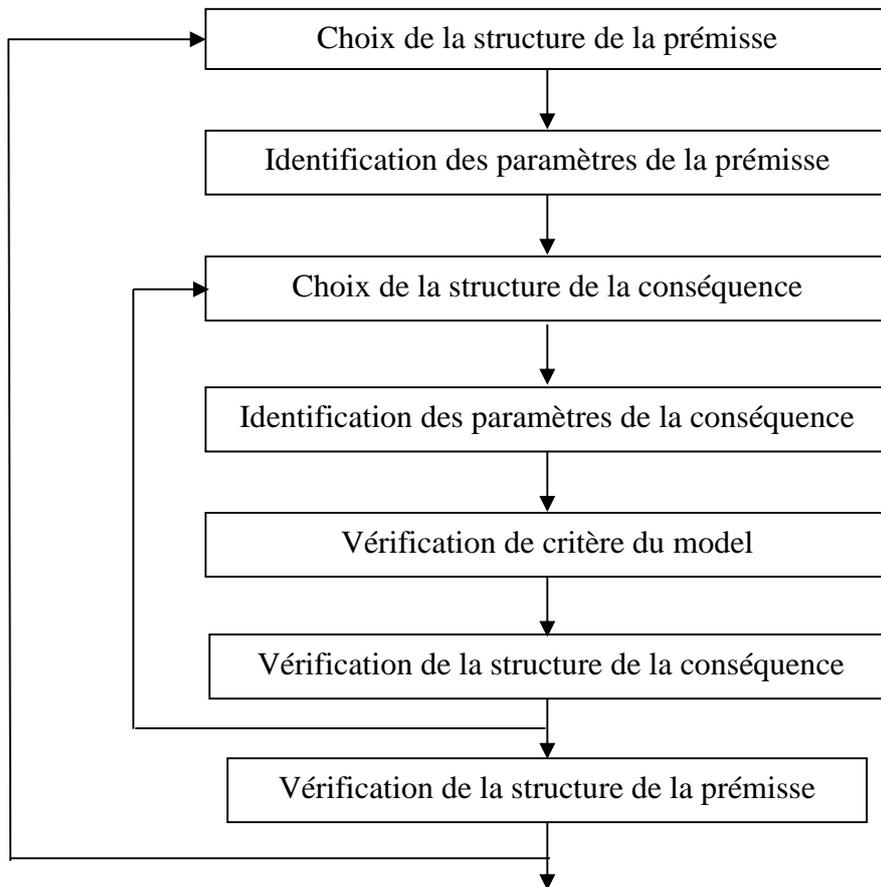


Figure II.3 : Aperçus de l'identification du modèle flou de type Takagi-Sugeno

Notez que toutes les variables dans une prémisse peut pas toujours apparait. Les étapes 1) et 2) sont liées à la partition d'espace des variables d'entrée dans certains sous-espaces flous. L'étape 3) est liée à décrire une relation d'entrée-sortie dans chaque sous-espace floue. Nous pouvons considérer la relation entre les trois éléments hiérarchiquement de 1) vers le bas à 3). L'algorithme de l'identification des implications est divisé en trois étapes correspondant aux trois éléments ci-dessus. Nous donnons d'abord une brève explication de l'algorithme à chaque étape [39].

II.6.1 Choix des variables de la prémisse

D'abord, une combinaison de variable de prémisse est choisie sur des variables d'entrée possibles nous pouvons considérer. Suivant la prémisse optimale et les paramètres de conséquence sont identifiés selon les étapes 2) et 3), ainsi que les erreurs entre les valeurs de sortie des données du modèle et de la sortie du système d'objectif sont calculées. Nous améliorons alors le choix de la prémisse de sorte que l'indice de performance est diminué, ce qui est défini comme étant la moyenne quadratique des erreurs de sortie [39].

Nous proposons un algorithme de choisir les variables de prémisse à partir des variables d'entrée considérables. Comme il a été indiqué précédemment, toutes les variables des conséquences n'apparaissent pas toujours dans les prémisses. Il y a deux problèmes concernés avec l'algorithme. L'un est le choix des variables: choisir une variable dans les prémisses implique que l'espace est divisé. L'autre est le nombre de divisions. Tout le problème est une combinatoire. Donc, en général il ne semble pas approcher théoriquement disponible. Ici, nous prenons seulement une méthode de recherche heuristique décrite dans les étapes suivantes.

Supposons que nous construisons un modèle flou d'un k – input x_1, \dots, x_k et le système à une seule sortie [39].

Etape 1: La gamme de x_1 est divisée en deux sous-espaces flous "*grand*" et "*petit*" et les plages d'autres variables x_2, \dots, x_k ne sont pas divisées, ce qui signifie que seulement x_1 apparaît dans les prémisses des implications [39].

Le modèle constitué de deux règles de production est donc [39]:

Si x_1 est $grand_1$ alors ...

Si x_1 est $petit_1$ alors ...

Ce modèle est appelé modèle 1 – 1, de même un modèle dans lequel le sous-espace de x_1 est divisé, et les sous-espaces des autres variables x_2, x_3, \dots, x_k ne le sont pas est appelé modèle 1 – 2 [39].

De la même manière, on obtient les k modèles dont chacun est composé de deux règles de production. En générale le modèle 1 – i est de la forme [39]:

Si x_1 est $grand_i$ alors ...

Si x_1 est $petit_i$ alors ...

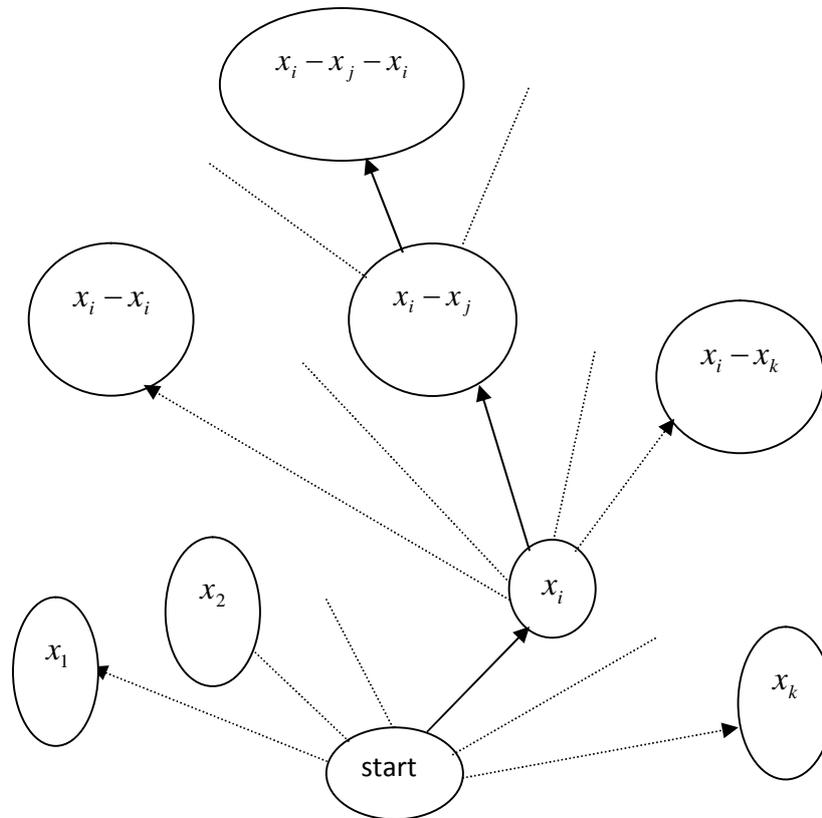


Figure II.4 : Choix des variables de prémisse.

Étape 2: Pour chaque modèle les paramètres optimaux de la prémisse et les paramètres de conséquence sont trouvés par l'algorithme décrit dans les sections précédentes. Le modèle optimal avec l'indice de performance moins est adopté sur les $k - \text{modèles}$. C'est ce qu'on appelle un état stable [39].

Étape 3: À partir d'un état stable à l'étape 1, disons modèle $1 - i$, où seul la variable x_i apparaît dans la prémisse de prendre toutes les combinaisons de $x_i - x_j$ ($j = 1, 2, \dots, k$) et diviser la gamme de chaque variable dans deux sous-espaces flous. Pour la combinaison $x_i - x_i$, la gamme de x_i est divisé en quatre sous-espace, par exemple "grand", "moyen grand", "moyen petit", "petit". Ainsi, nous obtenons $k - \text{modèle}$ dont chacun est nommé modèle $2 - i$. Chaque modèle se compose 2×2

implications. Ensuite, trouver un nouveau modèle avec l'indice de performance moins tout comme dans l'étape 2 qui est aussi appelé un état stable à cette étape [39].

Etape 4: Répétez l'étape 3 de la même manière en mettant une autre variable dans la prémisse [39].

Etape 5: La recherche s'arrête si un des critères de conditions suivantes est satisfait :

- 1) L'indice de performance d'un état stable devient inférieur à la valeur prédéterminée [39].
- 2) Le nombre de conséquences d'une Stable-Etat dépasse le nombre prédéterminé.
Le choix des variables dans comme les procédés des prémisses est représenté sur La figure (II.4) [39].

II.6.2 Identification des paramètres de la prémisse

Dans cette étape les paramètres de la prémisse optimale sont recherchés par la variable de la prémisse choisie à l'étape 1). En supposant que les valeurs des paramètres de la prémisse, nous pouvons obtenir les paramètres de la conséquence optimale ensemble avec l'indice de performance selon à l'étape 3). Donc, le problème de trouver les paramètres de la prémisse optimale est réduit à un problème de programmation non linéaire minimisant l'indice de performance [39].

Dans cette section, nous montrons comment identifier les ensembles flous dans les prémisses, c'est la manière de partitionner l'espace de la prémisse les variables dans les sous-espaces flous, à condition que les prémisses variables soient choisies. Comme il est facile de voir, de diviser les espaces dans certains sous-espaces flous est de déterminer les fonctions d'appartenance des ensembles flous dans les prémisses. Le problème est donc de trouver les paramètres optimaux de leurs fonctions d'appartenance par lequel l'indice de performance est minimisé[39].

Nous appelons cette procédure "identification des paramètres de principe." L'algorithme est le suivant :

- 1) En supposant que les paramètres des ensembles flous dans les prémisses, nous pouvons obtenir les paramètres optimaux dans les conséquences qui minimisent l'indice de performance tel que discuté dans la section précédente [39].
- 2) Le problème de trouver les paramètres optimaux de local en minimisant l'indice de

Lorsqu'un ensemble de données d'entrée-sortie $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{kj} \rightarrow y_i (j = 1, \dots, m)$ est donnée, nous pouvons obtenir les paramètres de conséquence $p_0^i, p_1^i, \dots, p_k^i (i = 1, \dots, n)$ par la méthode des carrés en utilisant (2.22) [39].

Soit $X (m \times n(k+1) \text{matrice})$, $Y (m \text{vecteur})$ et $P (n(k+1) \text{vecteur})$ soit :

$$X = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} \dots S_{n1} & x_{11} S_{11} \dots x_{11} S_{11} & \dots & x_{k1} S_{11} \dots x_{k1} S_{n1} \\ S_{12} & S_{22} \dots S_{n2} & x_{12} S_{12} \dots x_{12} S_{22} & \dots & x_{k2} S_{12} \dots x_{k2} S_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{1m} & S_{2m} \dots S_{nm} & x_{1m} S_{1m} \dots x_{1m} S_{2m} & \dots & x_{km} S_{1m} \dots x_{km} S_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Où

$$S_i = \frac{A_{i1}(x_{1j}) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_{kj})}{\sum_{i=1}^n (A_{i1}(x_{ij}) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_{kj}))} \quad (2.24)$$

$$Y = [y_1, \dots, y_m]^T \quad (2.25)$$

$$P = [p_0^1, \dots, p_0^n, p_1^1, \dots, p_1^n, \dots, p_k^1, \dots, p_k^n]^T \quad (2.26)$$

Alors le vecteur de paramètre P est calculé par :

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.27)$$

Il est à noter que la méthode proposée est compatible avec la méthode de raisonnements. En d'autres termes, cette méthode d'identification permet d'obtenir seulement les mêmes paramètres que le système d'origine, si nous avons un nombre suffisant de données de sortie bruité pour l'identification. Dans cet article le vecteur de paramètre P est calculé par filtre de kalman d'état-stable. Le soi-disant filtre de kalman d'état-stable est un algorithme permet de calculer les paramètres d'une équation algébrique linéaire qui donne les erreurs des moindres carrés. Ici, nous appliquons pour calculer le vecteur de paramètre P dans (2.27) [39].

Soit le vecteur $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice X définie dans (2.23) est x_i est le $i^{\text{ème}}$ élément de Y être y_i . Alors P est calculée de façon récursive par (2.28) et (2.29) où S_i est la matrice $(n \cdot (k+1)) \times (n \cdot (k+1))$.

$$P_{i+1} = P_i + S_{i+1} \cdot x_{i+1} (y_{i+1} - x_{i+1} \cdot P_i) \quad (2.28)$$

$$S_{i+1} = S_i - \frac{S_i \cdot x_i + x_{i+1} \cdot S_i}{1 + x_{i+1} \cdot S_{i+1} \cdot x_{i+1}^T}, \quad i = 0, 1, \dots, m-1 \quad (2.29)$$

$$P = P_m \quad (2.30)$$

Lorsque les valeurs initiales de P_0 et S_0 sont définies comme suit

$$P_0 = 0 \quad (2.31)$$

$$S_0 = \alpha.I \quad (\alpha = \text{grand nombre}) \quad (2.32)$$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'abord une approche structurale de la modélisation et de l'identification floues en nous focalisant particulièrement sur le modèle de type TS à partir des données entrées-sorties. En effet, au cours des dix dernières années la discipline a évolué d'une façon graduelle, vers une utilisation pratiquement exclusive des systèmes flous dans lesquels le conséquent des règles utilise des variables numériques sous la forme de fonction (modèle de type TS) plutôt que des variables linguistiques (modèle de type Mamdani). Ces modèles conservent les caractéristiques de transparence et d'interopérabilité linguistique qui distinguent les modèles flous d'autres approches similaires de type boîte noire.

Dans le cas de l'identification floue des systèmes, le formalisme Takagi-Sugeno est mieux adapté à une démarche plus systématique pour la construction de modèle non linéaires multi variables, grâce à leur bonne capacité d'interpolation numérique et d'apprentissage à partir de données. En utilisant ce formalisme, nous représentons le comportement non linéaire d'un système par une composition de règles du type « Si-Alors », concaténant un ensemble de sous-modèles localement linéaires sous la forme d'auto-régression non-linéaire (NARX). Les différentes zones d'opérations sont définies par les fonctions d'appartenance dans les antécédents et les sous-modèles linéaires sont associés aux conséquents des règles. Dans le cadre de nos travaux, les modèles flous de type TS sont considérés sous l'optique d'une approche de modélisation multilinéaire, qui essaie de résoudre un problème complexe de modélisation en le décomposant en plusieurs sous-problèmes plus simples. La théorie des ensembles flous offre alors un excellent outil pour représenter l'incertitude associée à la tâche de décomposition, en fournissant des transitions douces entre les sous-modèles linéaires et afin d'intégrer divers types de connaissance dans un même cadre. Les avantages du modèle flou de Takagi-Sugeno, Comparé à celle des modèles flous de Mamdani:

- La construction d'un support effective des modèles locaux linéaires par morceaux d'un modèle non linéaire.

- Fournir un moyen pratique d'appliquer facilement les théories sophistiquées de contrôle linéaires dans le contrôle non linéaire.
- Plus appropriée pour utiliser différents types d'algorithmes paramètre d'apprentissage.
- théoriquement les résultats dans le cas de modèles flous de Takagi-Sugeno sont stables.

CHAPITRE III : Simulation et Application à la Modélisation floue type TAKAGI- SUGENO

III.1 Introduction :

La modélisation du système est alors la première étape de l'élaboration d'une loi de commande. Le modèle qui permet de décrire la réalité physique est généralement obtenu sur la base d'une description idéalisée du système et seuls les phénomènes dominants sont souvent pris en compte [39].

Ce chapitre présente une application pratique de la méthode proposée aux procédés industriels réels. L'application est la modélisation floue des actions, de contrôle d'un opérateur humain dans un procédé de nettoyage de l'eau. Le modèle obtenu peut être directement utilisée à la place d'un opérateur pour commander le processus [39].

III.2 Modélisation floue des actions de contrôle de l'opérateur humain

III.2.1 Processus de nettoyage de l'eau

Nous allons maintenant montrer un exemple où les actions de contrôle d'un opérateur sont modélisées flou. Le processus de contrôle est un processus de nettoyage de l'eau pour l'approvisionnement civile en eau comme cela est illustré sur la Figure III.1. Dans le processus eau turbide de rivière vient en premier dans un réservoir de mélange où produits chimiques appelés PAC ainsi que le chlore est mis et mélangée dans l'eau. Puis s'écoule l'eau mélangée dans un bassin de décantation où la partie de l'eau est trouble cohérent à l'aide du PAC et se sont installés au fond [39].

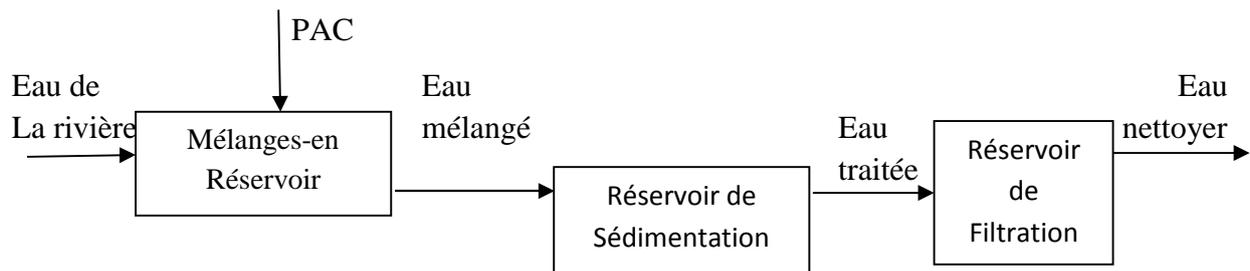


Figure III.1 : Processus de nettoyage de l'eau.

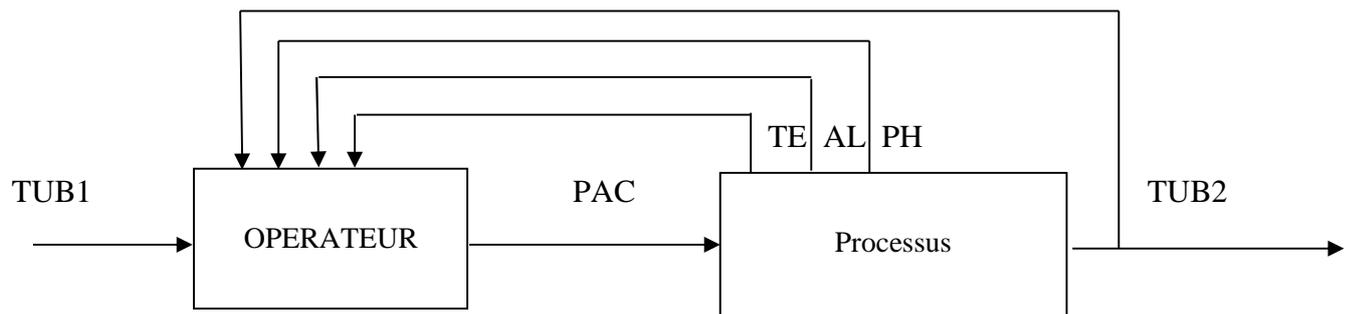


Figure III.2 : Schéma du processus de contrôle.

Après sédimentation, ce qui prend environ 3-5 heures dépendance de la capacité du réservoir, l'eau traitée enfin s'écoule dans une cuve de filtration produire de l'eau propre. Chlore est ajouté seulement à la stérilisation de l'eau. Le problème principal de commande d'un

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

opérateur humain dans ce processus est de déterminer la quantité de PAC à ajouter de manière que la turbidité de l'eau traitée est maintenant au-dessous d'un certain niveau. La quantité optimale, ni trop beaucoup, dépend des propriétés de l'eau trouble. La quantité de PAC doit être contrôlée aussi d'un point économique de vue. Le procédé est caractérisé par l'absence de tout physique modèle, une variation significative de la turbidité de l'eau de la rivière et le fait que la turbidité elle-même n'est pas clairement définie ni mesuré avec précision. Donc, l'expérience d'un opérateur est une clé facteur dans ce processus de commande [39].

Cependant, un certain nombre de variables qui influencent sédimentation processus clé ont été trouvées à ce jour qui peut être mesuré.

Laissez-nous abord dresser la liste de toutes les variables concernées.

TB1 turbidité de l'eau d'origine (ppm).

TB2 turbidité de l'eau traitée (ppm).

PAC montant du PAC (ppm).

TE température de l'eau (°c).

PH potentiel d'hydrogène.

CL montant de chlore (ppm).

Par exemple, si TE est plus faible, puis plus PAC est nécessaire. Le PH et AL affectent de façon non linéaire la quantité nécessaire des PAC. Le PAC optimal dépend de ces variables ; la relation entre eux n'est pas claire. Il y a une autre les variables qui influent sur le processus, par exemple, le plancton dans l'eau de la rivière, ce qui augmente au printemps, mais ne peut pas être mesurée à l'heure actuelle [39].

Dans la plupart des processus de nettoyage de l'eau un modèle statistique a été construit. Toutefois, les modèles ne sont pas exactes. Ces couvrir uniquement l'état d'équilibre, c'est-à-dire, une petite gamme de TUB1 et TUB2 augmente par exemple 100 fois plus quand il pleut. Ainsi, un opérateur des commandes PAC en tenant compte de TB1, TE, PH, AL et TB2. Maintenant, notre processus peut être illustré comme dans la figure III.2 [39].

Nous avons beaucoup de données de fonctionnement où toutes les variables sont mesurées toutes les heures pendant quatre mois. Autrement dit, le nombre de données est :

24 heures × 30 jours × 4 mois = 2880.

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

Le tableau III.1 montre une partie de ceux-ci [39].

| TUB1 | PH | TE | AL | PAC | TUB2 |
|------|-----|------|----|------|------|
| 10.0 | 7.1 | 18.8 | 53 | 1300 | 1 |
| 17.0 | 7.0 | 18.6 | 50 | 1300 | 1 |
| 22.0 | 7.3 | 19.4 | 46 | 1400 | 2 |
| 50.0 | 7.1 | 19.5 | 40 | 1400 | 1 |
| 9.0 | 7.3 | 23.3 | 48 | 900 | 4 |
| 11.0 | 7.1 | 20.7 | 50 | 900 | 1 |
| 12.0 | 7.2 | 21.3 | 50 | 900 | 3 |
| 14.0 | 7.2 | 23.6 | 53 | 900 | 4 |
| 35.0 | 7.0 | 17.8 | 35 | 1200 | 1 |
| 20.0 | 7.0 | 16.6 | 40 | 1100 | 1 |
| 20.0 | 6.9 | 17.8 | 42 | 1100 | 1 |
| 18.0 | 7.1 | 16.6 | 40 | 1100 | 1 |
| 12.0 | 7.2 | 17.8 | 55 | 900 | 3 |
| 8.0 | 7.2 | 17.3 | 50 | 1000 | 1.5 |
| 11.0 | 7.1 | 18.8 | 49 | 1000 | 2 |
| 50.0 | 7.0 | 18 | 37 | 1200 | 1.5 |
| 35.0 | 7.0 | 17.7 | 42 | 1200 | 1.5 |
| 30.0 | 7.0 | 17.3 | 41 | 1100 | 1.5 |
| 16.0 | 7.1 | 19.3 | 42 | 1100 | 3 |

Tableau III.1 : Donnée expérimental du processus d'épuration.

III.3 Application à la modélisation floue

III.3.1 Application au processus d'épuration des eaux

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

La technique précédemment présentée, sera appliquée dans ce qui suit, pour la modélisation des actions de contrôle de la quantité du coagulant (Polychlorure basique d'aluminium :PAC) à ajouter à l'eau de surface, non traitée pour que la turbidité de l'eau soit maintenue au dessous d'un certain niveau de tolérance. Il est toute fois difficile de mettre la quantité adéquate du coagulant sachant que la turbidité de l'eau dépend de plusieurs facteurs pouvant la polluer [4].

Par exemple, si TE est faible, alors plus de PAC est nécessaire, par contre pH et AL affectent de façon non linéaire la quantité du PAC nécessaire, le PAC optimal dépend de ces variables. La relation entre ces variables n'est pas claire. Notons qu'il existe d'autres variables qui influent sur le processus mais qui ne sont pas toujours mesurables; par exemple le nombre de planctons contenus dans l'eau de surface qui augmente au printemps et qui ne peut être mesuré les autres saisons. Selon l'algorithme d'identification de la structure du modèle flou discuté précédemment, et en suivant les étapes décrites on obtient [4]:

En se basant sur les mesures prises avant le traitement, l'univers de discours de chaque variable qui apparait dans la prémisse sera exprimé linguistiquement [4].

- **Étape1 :**

Le sous-espace de *PH* divisé en deux sous espaces flous « grand » et « petit » et les sous espaces des autres variables (*TE, AL*) ne sont pas divisés, ce qui veut dire que seul *PH* apparait dans l'antécédent.

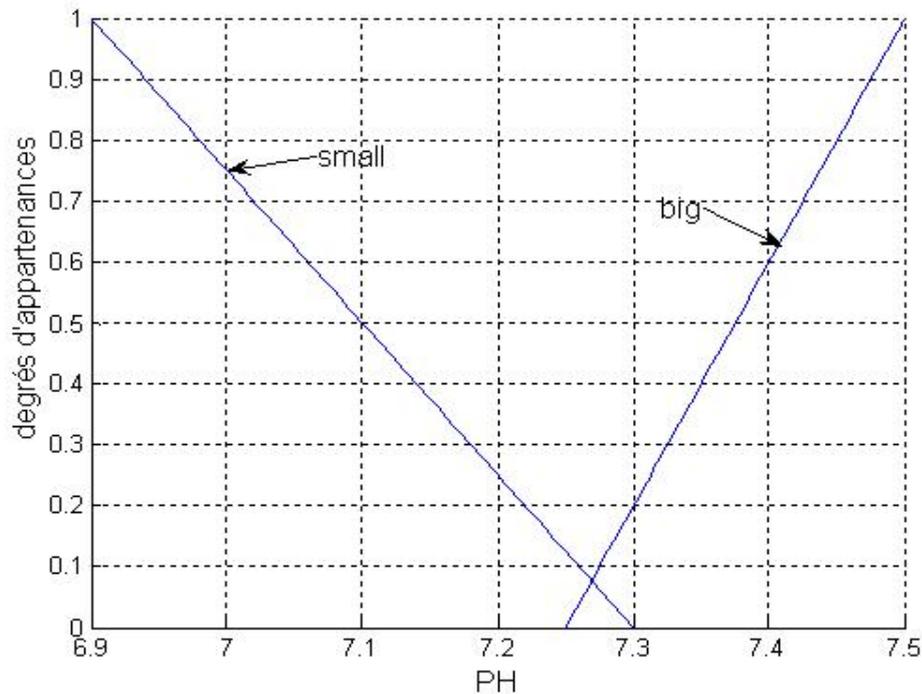


Figure III.3 : fonction d'appartenance de la variable PH

Le modèle constitué de deux règles de production est donc :

$$\text{If } PH \text{ is small then } PAC = a_{10} + a_{11} * PH + a_{12} * TE + a_{13} * AL + a_{14} * TB1 + a_{15} * TB2$$

$$\text{If } PH \text{ is big then } PAC = a_{20} + a_{21} * PH + a_{22} * TE + a_{23} * AL + a_{24} * TB1 + a_{25} * TB2$$

Ce modèle est appelé modèle 1-1, de même un modèle dans lequel le sous espace de TE est divisé, et les sous espaces des autres variables ($PH, AL, TB1, TB2$) ne le sont pas est appelé modèle 1-2.

De la même manière, on obtient les 5 modèles dont chacun est composé de deux règles de production.

- **Etape 2 :**

Pour chaque modèle, les paramètres de la conséquence sont trouvés par l'algorithme des moindres carrés décrit dans les sections précédentes.

Le modèle avec le plus petit indice de performance est choisi en dehors des 5 modèles. Ce modèle est appelé état stable.

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

Le tableau III.1, illustre une comparaison de l'indice de performance ainsi que la variance entres les 5 modèles.

| | Indice de performance | variance | Erreur en moyenne |
|-----------------|-----------------------|----------|-------------------|
| Modèle 1-1(PH) | 78.926 | 10957 | $-1.99*10^{-9}$ |
| Modèle 1-2(TE) | 75.94 | 10355 | $8.46*10^{-10}$ |
| Modèle 1-3(AL) | 87.038 | 13568 | $1.85*10^{-9}$ |
| Modèle 1-4(TB1) | 87.06 | 11711 | $1.84*10^{-10}$ |
| Modèle 1-5(TB2) | 90.71 | 13655 | $-7.01*10^{-11}$ |

Tableau III.2 : Indice de performance par modèle.

On déduit que le modèle 1-2 dont TE seule apparait dans la prémisse est l'état stable. La figure III.4 montre la sortie du modèle par rapport à celle de l'expert pour la variable TE avec un indice de performance égal à 75.94 [4].

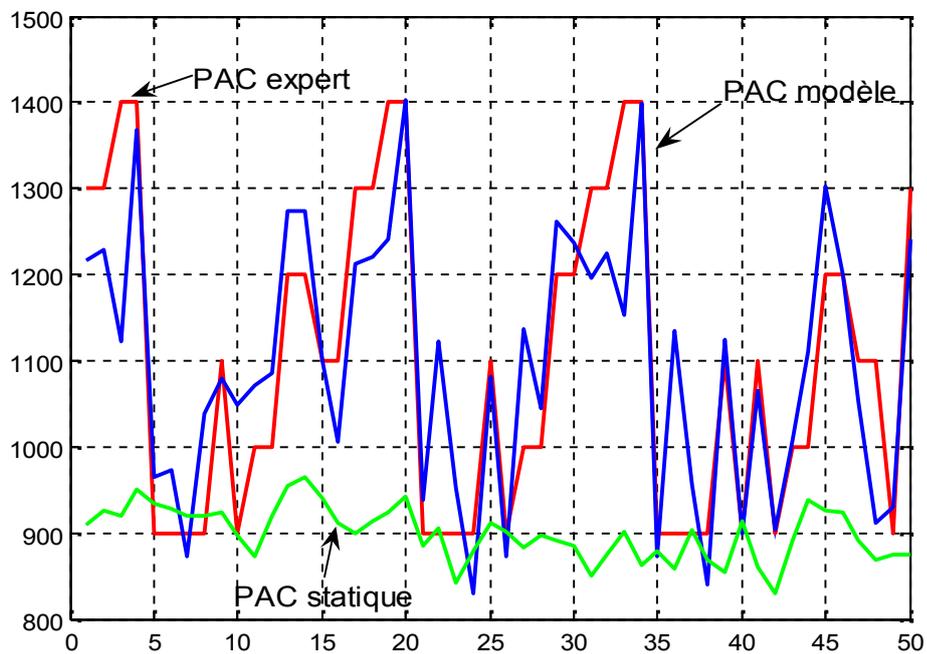


Figure III.4 : sortie du modèle flou avec la variable (TE) dans la prémisse

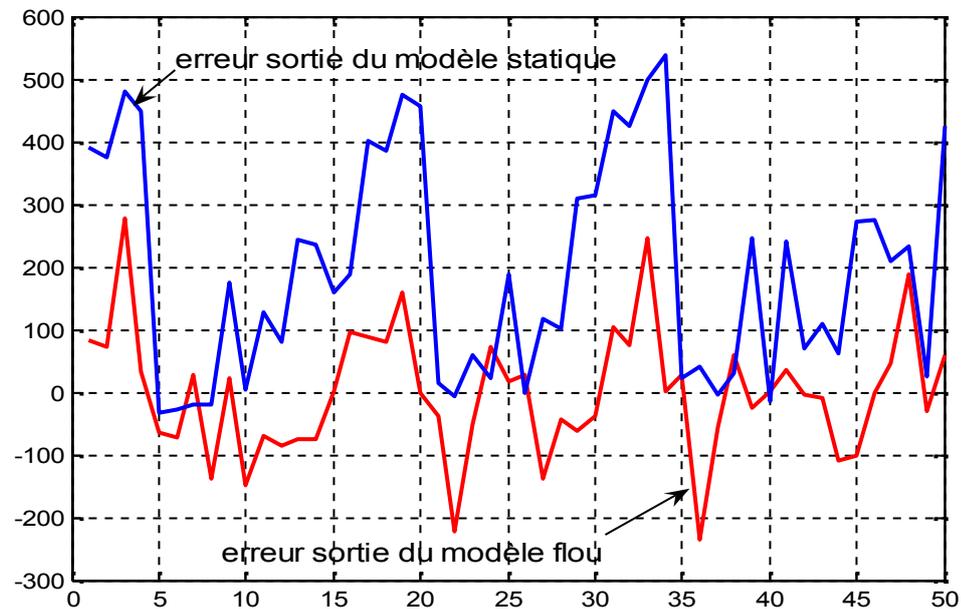


Figure III.5 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE) dans la prémisse

- **Etape 3 :**

On prend toutes les combinaisons de (TE, TE) , (TE, PH) , (TE, AL) , $(TE, TB1)$ et $(TE, TB2)$ et on divise le sous espace de chaque variable en deux sous espaces flous.

Pour la combinaison (TE, TE) , le sous espace de TE est divisé en quatre sous espaces flous, par exemple « grand », « moyen grand », « moyen petit » et « petit ».

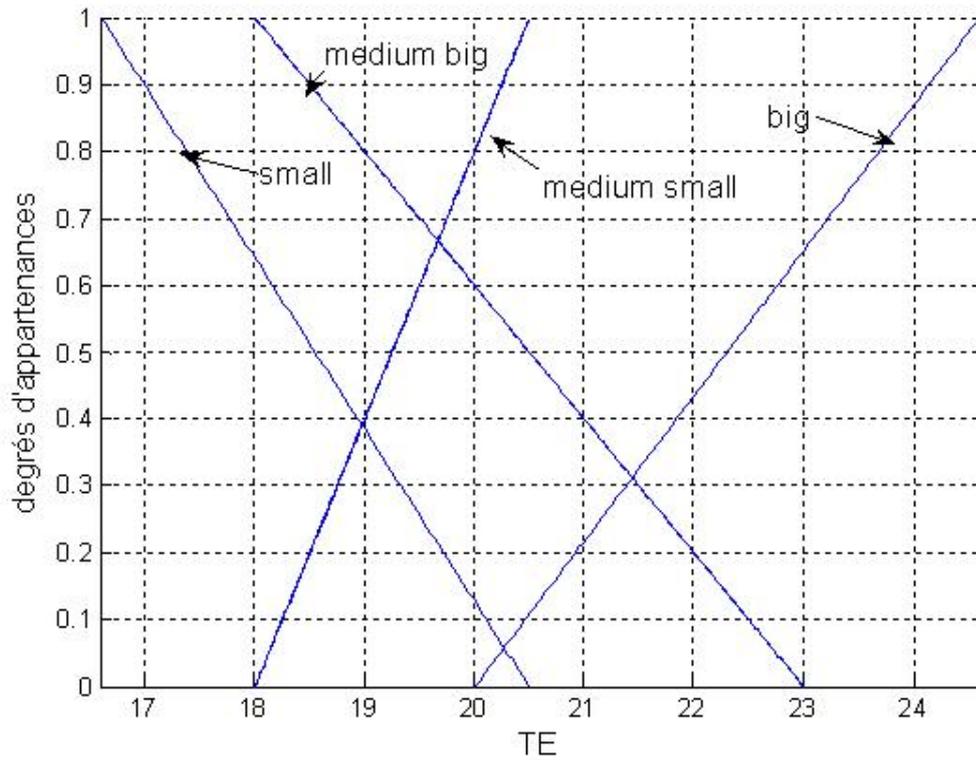


Figure III.6 : Fonction d'appartenance de la variable TE divisé en 4 sous espaces flous

Le modèle constitué de quatre règles de production est donc :

If TE is small then

$$PAC = a_{10} + a_{11} * PH + a_{12} * TE + a_{13} * AL + a_{14} * TB1 + a_{15} * TB2$$

If TE is medium small then

$$PAC = a_{20} + a_{21} * PH + a_{22} * TE + a_{23} * AL + a_{24} * TB1 + a_{25} * TB2$$

If TE is medium big then

$$PAC = a_{30} + a_{31} * PH + a_{32} * TE + a_{33} * AL + a_{34} * TB1 + a_{35} * TB2$$

If TE is big then

$$PAC = a_{40} + a_{41} * PH + a_{42} * TE + a_{43} * AL + a_{44} * TB1 + a_{45} * TB2$$

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

A la fin on aura 5 modèles de la forme du modèle 2-j, chacun est constitué de 2*2 règles de productions [4].

Le tableau III.3, illustre l'indice de performance, la variance ainsi que l'erreur en moyenne pour les 5 modèles :

| | Indice de performance | Variance | Erreur en moyenne |
|--------------------|-----------------------|----------|-------------------|
| Modèle 2-1(TE-TE) | 67.74 | 7811.6 | $2.19*10^{-6}$ |
| Modèle 2-2(TE-PH) | 41.86 | 2853.5 | $1.92*10^{-9}$ |
| Modèle 2-3(TE-AL) | 63.15 | 7839.1 | $8.47*10^{-10}$ |
| Modèle 2-4(TE-TB1) | 130.47 | 38664 | 80.37 |
| Modèle 2-4(TE-TB2) | 54.49 | 5850.2 | $1.57*10^{-9}$ |

Tableau III.3 : Indices de performance par modèle de deux variables.

Le modèle 2-2 au plus petit indice de performance ce qui veut dire que les variables TE et PH apparaissent dans la prémisse et c'est l'état stable [4].

Chacune des variables est divisées en deux sous ensembles flous :

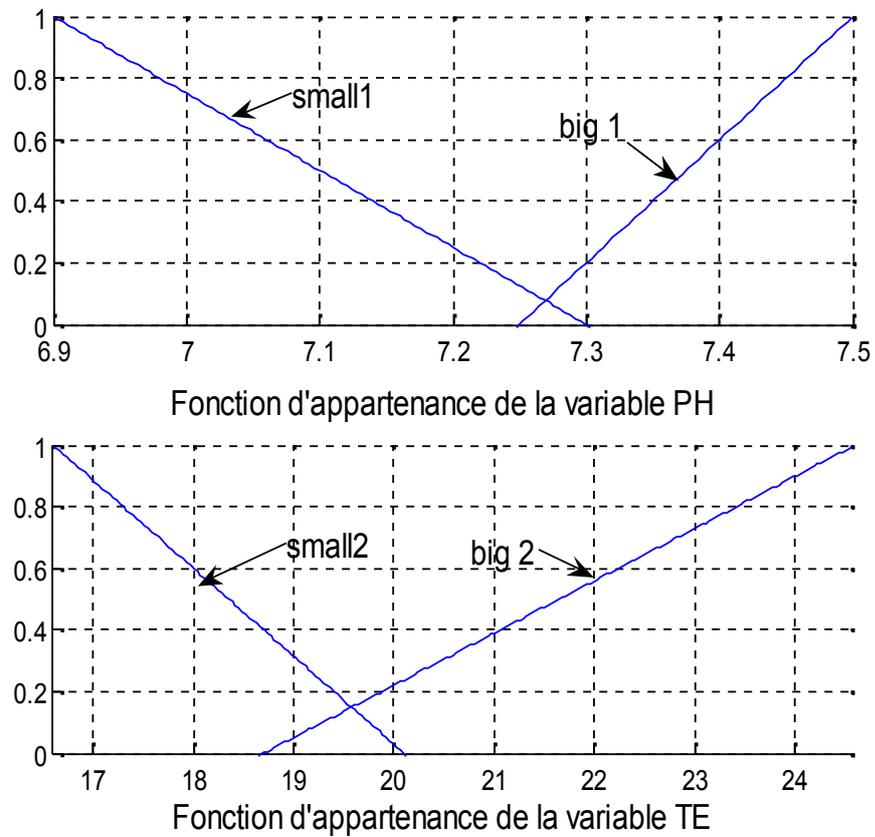


Figure III.7 : Fonctions d'appartenance des variables PH et TE dans l'antécédent.

Les règles de productions sont de la forme :

If PH is small1 and TE is small2 then

$$PAC = 1839.5 - 369.07 * PH + 104.56 * TE + 3.94 * AL + 3.38 * TB1 - 149.99 * TB2$$

If PH is small1 and TE is big2 then

$$PAC = 7647.9 - 1144.1 * PH + 104.05 * TE - 15.37 * AL + 10.1 * TB1 - 55.78 * TB2$$

If PH is big1 and TE is small2 then

$$PAC = 85893 - 12403 * PH + 204.21 * TE - 40.07 * AL + 5.85 * TB1 + 22.95 * TB2$$

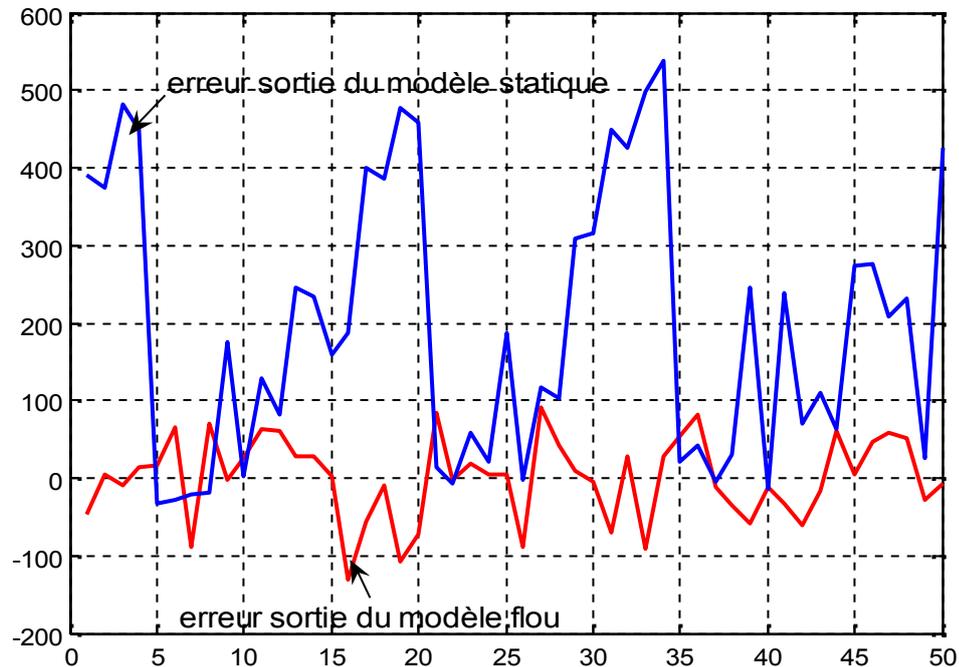


Figure III.9 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE, PH) dans la prémisse

L'erreur entre le PAC donné par l'expert et celui obtenu par le modèle flou (variance= 2853.5 ; erreur en moyenne = $1.92 \cdot 10^{-9}$) est plus centré et possède une variance plus faible que celle du modèle statique [4].

Nous devons maintenant passer à impliquer 3 variables dans la prémisse

On prend maintenant toutes les combinaisons

$(TE, PH, TE), (TE, PH, PH), (TE, PH, AL), (TE, PH, TB1)$ et $(TE, PH, TB2)$ et on divise le sous espace de chaque variable en deux sous espaces flous.

Pour (TE, PH, TE) : l'espace de TE est divisé en quatre sous espaces flous et PH en deux, donc on aura 8 règles de production de la forme :

If TE is small and PH is small then

$$PAC = a_{10} + a_{11} * PH + a_{12} * TE + a_{13} * AL + a_{14} * TB1 + a_{15} * TB2$$

If TE is small and PH is big then

$$PAC = a_{20} + a_{21} * PH + a_{22} * TE + a_{23} * AL + a_{24} * TB1 + a_{25} * TB2$$

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

If TE is medium small and PH is small then

$$PAC = a_{30} + a_{31} * PH + a_{32} * TE + a_{33} * AL + a_{34} * TB1 + a_{35} * TB2$$

If TE is medium small and PH is big then

$$PAC = a_{40} + a_{41} * PH + a_{42} * TE + a_{43} * AL + a_{44} * TB1 + a_{45} * TB2$$

If TE is medium big and PH is small then

$$PAC = a_{50} + a_{51} * PH + a_{52} * TE + a_{53} * AL + a_{54} * TB1 + a_{55} * TB2$$

If TE is medium big and PH is big then

$$PAC = a_{60} + a_{61} * PH + a_{62} * TE + a_{63} * AL + a_{64} * TB1 + a_{65} * TB2$$

If TE is big and PH is small then

$$PAC = a_{70} + a_{71} * PH + a_{72} * TE + a_{73} * AL + a_{74} * TB1 + a_{75} * TB2$$

If TE is big and PH is big then

$$PAC = a_{80} + a_{81} * PH + a_{82} * TE + a_{83} * AL + a_{84} * TB1 + a_{85} * TB2$$

De même pour la combinaison (TE, PH, PH) où l'espace de PH est divisé en quatre sous espaces flous et TE en deux.

Le tableau III.3, illustre les différences dans l'indice de performance.

| | Indice de performance | Variance | Erreur en moyenne |
|-----------------------|--------------------------|---------------|----------------------|
| Modèle 3-1(TE-PH-TE) | 175.13 | $1.09 * 10^5$ | -101.79 |
| Modèle 3-2(TE-PH-PH) | 117.85 | 22485 | -28.06 |
| Modèle 3-3(TE-PH-AL) | 1.95 | 26.51 | -1.18 |
| Modèle 3-4(TE-PH-TB1) | 444.3 | $1.05 * 10^6$ | 397.7 |
| Modèle 3-5(TE-PH-TB2) | 472.25 | $1.07 * 10^6$ | -317.42 |

Tableau III.4 : indice de performance par modèle de trois variables.

Comme ça était déjà cité dans les sections précédentes qu'afin d'obtenir un indice de

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

performance optimal il faut déterminer les fonctions d'appartenance optimale minimisant cet indice, et donc en changeant les sous espaces des fonctions d'appartenances, et c'est ce qui a été fait avant d'obtenir l'indice de performance égal à 1.95, sachant qu'on avait d'abord 18.08 ensuite 14.3, etc [4].

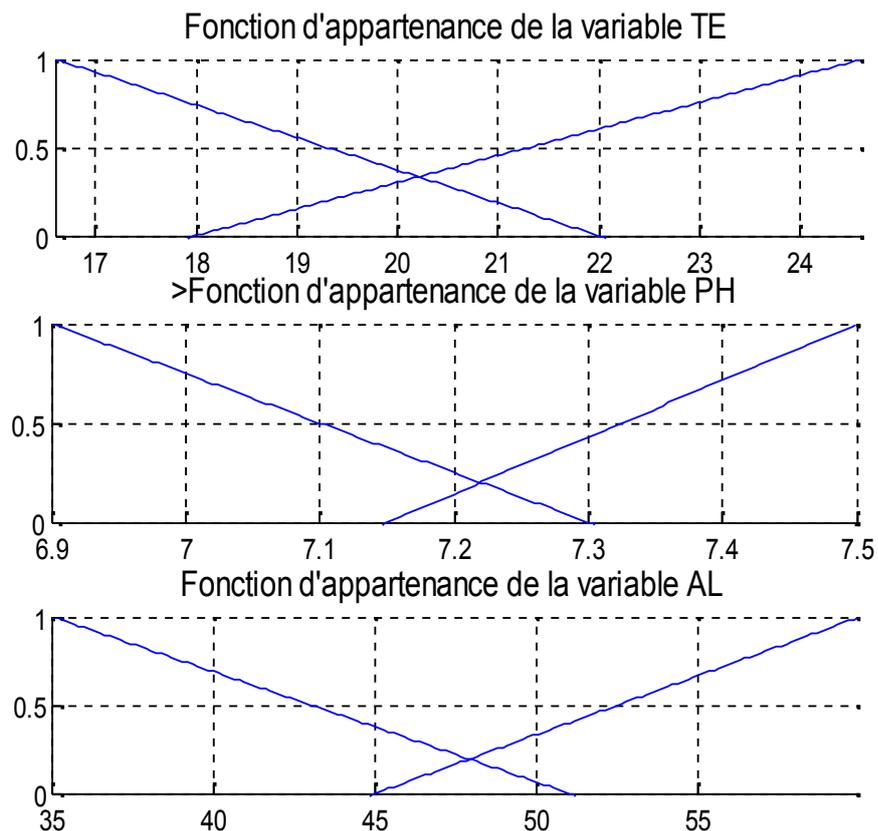


Figure III.10 : Fonction d'appartenance des variables TE, PH et AL

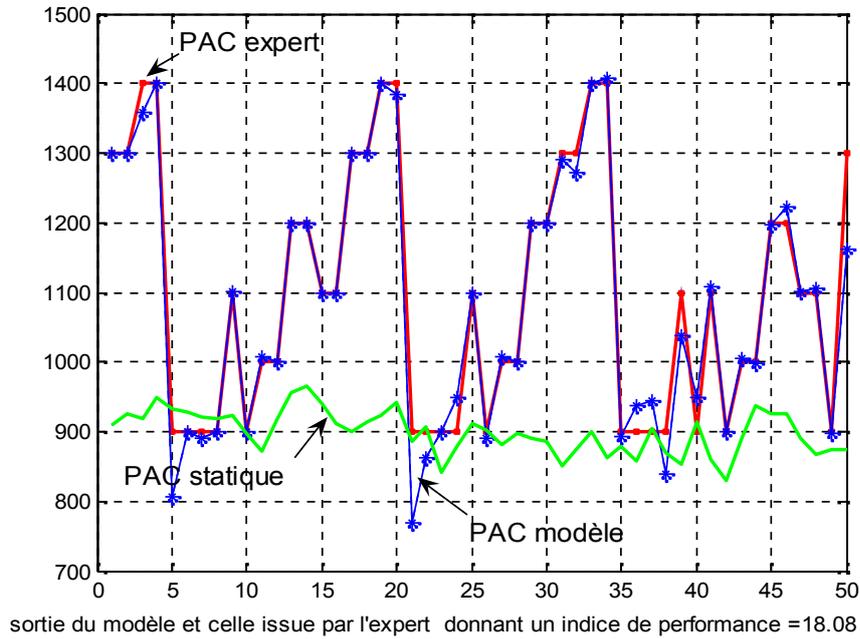


Figure III.11 : Sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisse donnant un indice de performance égal à 18.08.

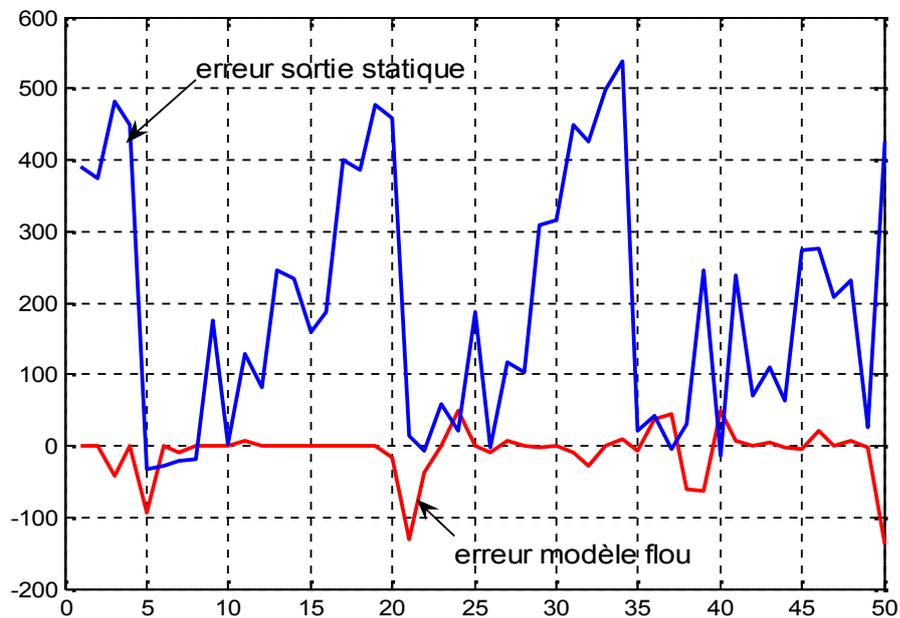


Figure III.12 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisse avec indice de performance= 18.08

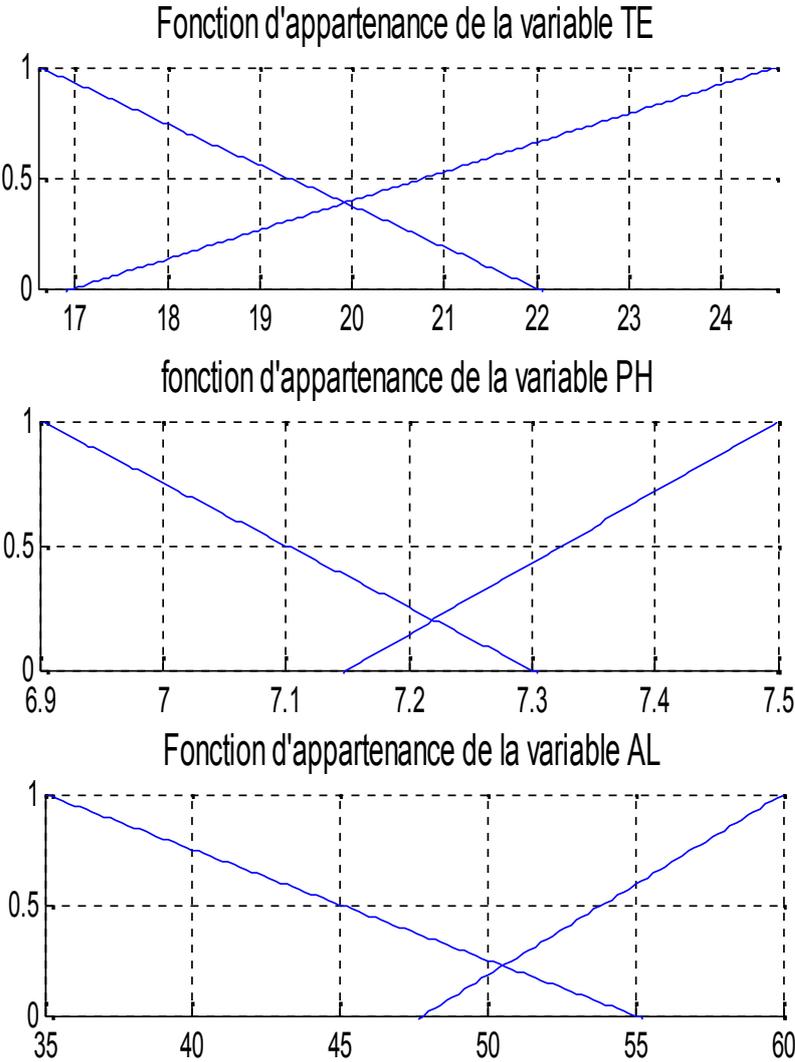


Figure III.13 : Fonctions d'appartenances TE PH AL

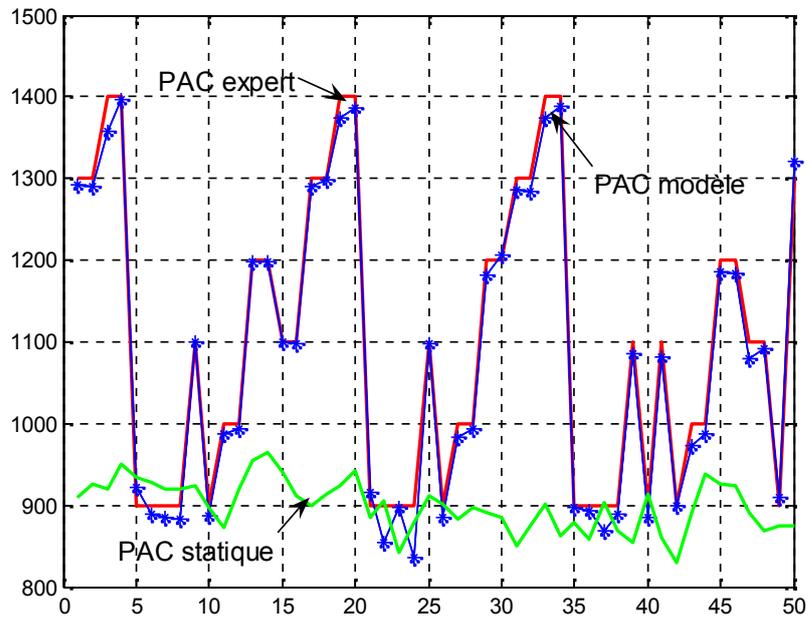


Figure III.14 : sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH) dans la prémisse donnant un indice de performance égal à 14.3

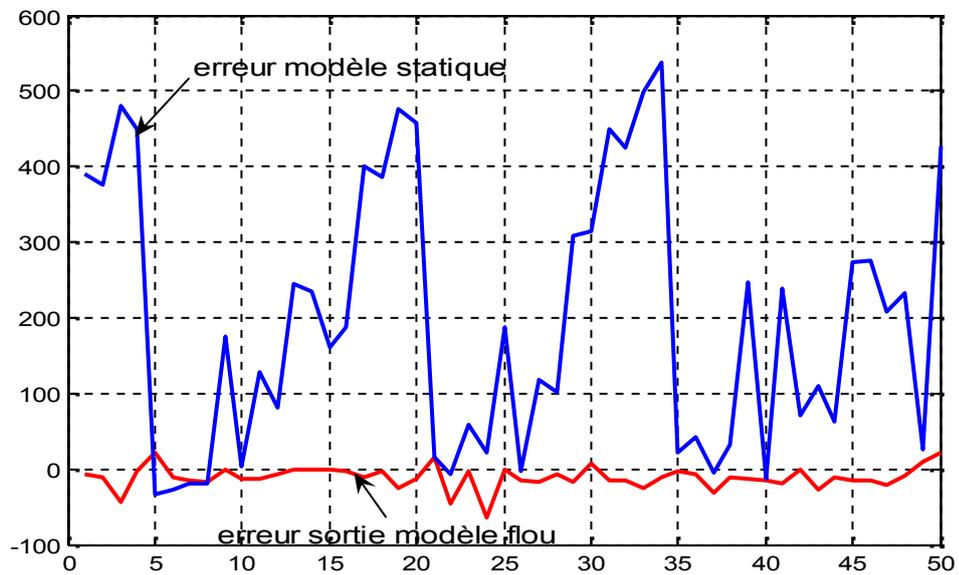


Figure III.15 : Comparaison des erreurs du modèle flou et celui du modèle statique avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisse avec indice de performance= 14.3

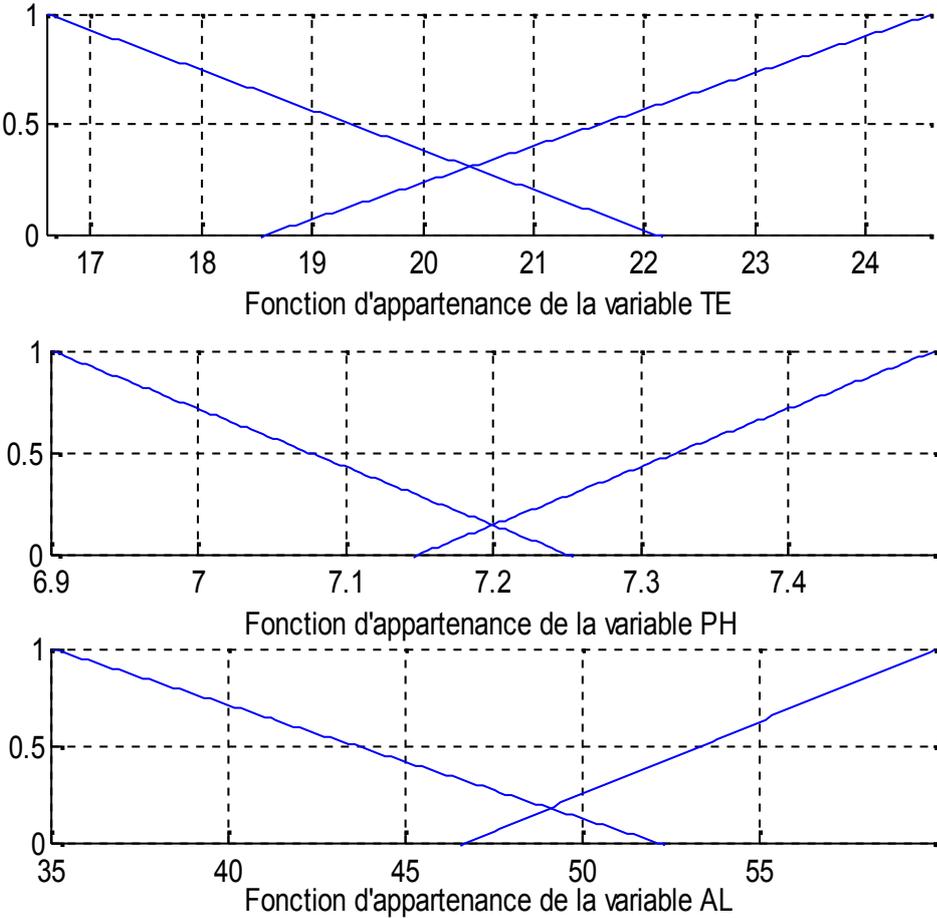


Figure III.16 : Fonction d'appartenance

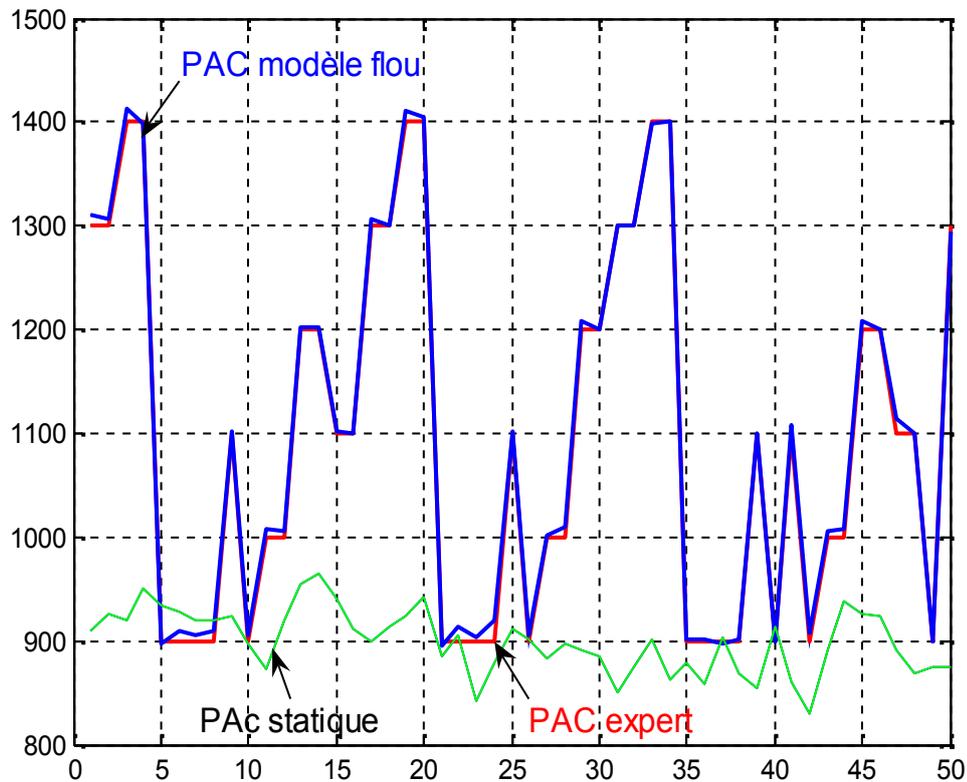


Figure III.17 : sortie du modèle flou avec la variable (TE, PH, AL) dans la prémisses donnant un indice de performance égal à 4.89

Et de là on peut déduire que le modèle avec le plus petit indice de performance est le modèle 3-3, avec 8 règles de production :

If PH is small1 and TE is small2 and AL is small3 then

$$PAC = -3.81 + 4.43 * 10^5 * PH + 33354 * TE - 0.014 * AL - 1162.4 * TB1 + 1.16 * 10^5 * TB2$$

If PH is small1 and TE is small2 and AL is big3 then

$$PAC = -4.86 + 7.26 * 10^7 * PH + 1.17 * 10^6 * TE - 7.85 * AL - 3.1 * TB1 - 5.26 * TB2$$

If PH is small1 and TE is big2 and AL is small3 then

$$PAC = -2.12 + 3.38 * 10^6 * PH - 1.89 * TE + 7955.5 * AL + 47074 * TB1 + 1.98 * TB2$$

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

If PH is small1 and TE is big2 and AL is big3 then

$$PAC = 1.6 * 10^8 - 1.7 * PH - 2.77 * TE - 6.83 * AL + 82465 * TB1 + 2.32 * 10^6 * TB2$$

If PH is big1 and TE is small2 and AL is small3 then

$$PAC = -6.87 * 10^7 + 7.38 * 10^6 * PH + 1.54 * 10^5 * TE + 2.26 * 10^5 * AL - 26192 * TB1 + 7.5 * 10^5 * TB2$$

If PH is big1 and TE is small2 and AL is big3 then

$$PAC = -2.63 + 3.79 * 10^7 * PH - 1.21 * TE - 2.5 * AL + 83058 * TB1 + 96250 * TB2$$

If PH is big1 and TE is big2 and AL is small3 then

$$PAC = 2.11 * 10^6 - 1.03 * PH - 10042 * TE - 22600 * AL + 13.71 * TB1 + 1034 * TB2$$

If PH is big1 and TE is big2 and AL is big3 then

$$PAC = -3.03 + 2.91 * 10^5 * PH - 44359 * TE + 35196 * AL - 613.61 * TB1 - 4005.4 * 10^6 * TB2$$

III.3.2 Résultats du contrôle flou

Les résultats présentés dans le tableau III.5 montrent les performances de notre modèle flou.

Les résultats obtenus ($PAC_{\text{modèle}}$) sont très proches de ceux obtenus par l'habile et expérimenté opérateur humain (PAC_{expert}) et sont nettement meilleurs que ceux obtenus à l'aide du modèle statique (PAC_{statique}), utilisé jusqu'à nos jours dans la majorité des stations qui est représenté par la formule empirique suivante :

$$PAC = 9.11\sqrt{TB1} - 79.8PH + 12.7CL + 1255.6$$

Chapitre III : Simulation et application à la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO

Le tableau ci-dessous, illustre les résultats obtenus.

| PAC expert | PAC modèle flou | PAC statique | | | |
|------------|-----------------|--------------|------|--------|--------|
| 1300 | 1300.9 | 909.09 | 900 | 898.7 | 901.79 |
| 1300 | 1300.6 | 918.99 | 1000 | 999.1 | 882.05 |
| 1400 | 1395 | 950.29 | 1000 | 1000.8 | 897.48 |
| 1400 | 1401.8 | 933.68 | 1200 | 1200.6 | 891.48 |
| 900 | 883.9 | 927.9 | 1200 | 1200.1 | 884.82 |
| 900 | 902.3 | 919.99 | 1300 | 1300 | 851.12 |
| 900 | 898.7 | 919.85 | 1300 | 1299.7 | 874.38 |
| 900 | 900.9 | 923.77 | 1400 | 1399.8 | 900.98 |
| 1100 | 1099.9 | 896.75 | 1400 | 1400.1 | 862.93 |
| 900 | 900.4 | 896.75 | 900 | 900.2 | 878.61 |
| 1000 | 1000 | 872.16 | 900 | 900.1 | 858.58 |
| 1000 | 1001.5 | 919.01 | 900 | 899.8 | 904.03 |
| 1200 | 1199.9 | 955.47 | 900 | 900 | 868.52 |
| 1200 | 1199.9 | 965.13 | 1100 | 1100 | 854.03 |
| 1100 | 1099.9 | 939.94 | 900 | 900.1 | 913.75 |
| 1100 | 1101.2 | 911.9 | 1100 | 1100 | 860.28 |
| 1300 | 1300.6 | 899.82 | 900 | 900.7 | 830.07 |
| 1300 | 1299.9 | 913.5 | 1000 | 999.8 | 890.25 |
| 1400 | 1404.1 | 923.77 | 1000 | 1001.1 | 937.9 |
| 1400 | 1399.3 | 942.69 | 1200 | 1199.8 | 926.62 |
| 900 | 877.4 | 884.89 | 1200 | 1199.7 | 924.7 |
| 900 | 895.3 | 906.36 | 1100 | 1101.1 | 891.2 |
| 900 | 900.2 | 841.93 | 1100 | 1100.1 | 868.05 |
| 900 | 899.2 | 878.17 | 900 | 899.5 | 874.12 |
| 1100 | 1099.9 | 911.86 | 1300 | 1277.3 | 873.89 |

Tableau III.5 : Illustration des résultats flous, statiques et mesurés.

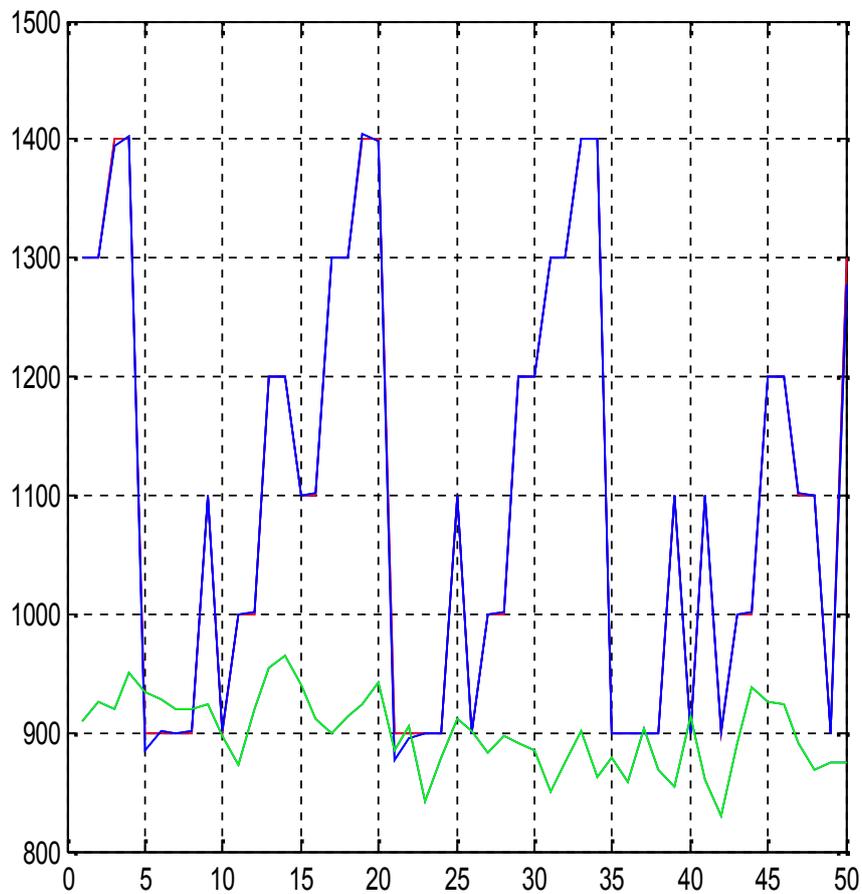


Figure III.18 : PAC statique, PAC modèle flou et PAC de l'expert.

D'après la figure III.8, les valeurs du $PAC_{\text{modèle}}$ sont proches de celles choisies par l'expert. Nous remarquons aussi que les valeurs obtenues par la formule empirique ne sont pas performantes.

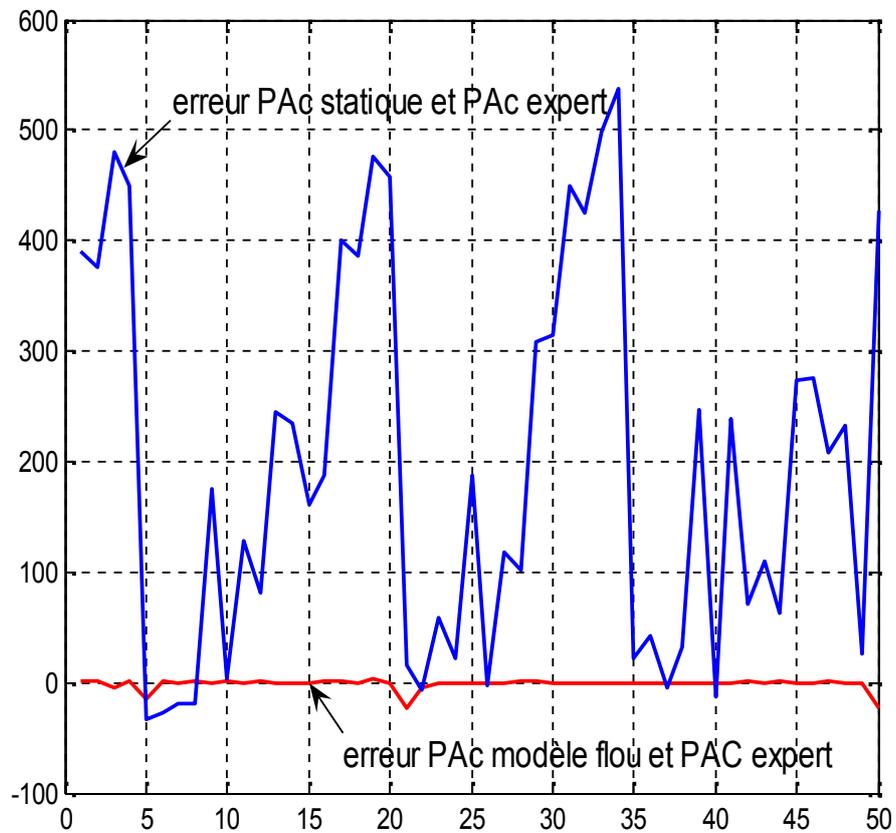


Figure III.19 : erreurs PAC modélisation et expert_ PAC statique.

On voit bien en figure III.19 que l'erreur moyenne entre PAC expert et PAC modèle flou est très faible devant celle qui existe entre le PAC expert et le PAC statique (environ 196.12)

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé, en modélisant et en simulant sous Matlab le processus d'épuration par la logique floue de type Takagi-Sugeno.

L'application ainsi que les résultats de la simulation montrent que la méthode proposée est très utile.

Les comparaisons effectuées entre les deux modèles statique et flou Takagi-Sugeno, permet d'un côté, de minimiser l'erreur et d'un autre côté, permet ont obtenu un modèle s'est avéré très efficace et permet une automatisation du procédé d'adjonction du produit PAC dans le processus d'épuration.

Le modèle flou pourrait être une excellente alternative en remplacement du modèle statique utilisé jusqu'à nos jours dans les stations d'épuration.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire s'articulent autour des thèmes principaux de la modélisation floue de type TAKAGI-SUGENO (TS) pour une application à une station d'épuration. Ces travaux sont divisés en trois parties, une première concernant le traitement des eaux et la seconde, sur la modélisation floue type TAKAGI-SUGENO et la troisième une simulation et application à la modélisation utilisant ce type de régulateur.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différentes étapes du traitement des eaux, nous avons vu que le prétraitement est un traitement préliminaire comportant un certain nombre d'opérations à caractère mécanique (procédés physiques). Le but est d'extraire de l'eau les gros déchets en suspension ou en flottation (sables, huiles) qui pourraient gêner les traitements subséquents. L'élimination préalable de ces matières permet d'éviter des effets nocifs secondaires (odeurs, colmatage...).

Le traitement primaire fait appel à des procédés physiques, avec décantation des matières en suspension dans un bassin de sédimentation.

Le traitement physico-chimique, pour la précipitation du phosphore (coagulation-décantation) ou l'élimination des dernières matières en suspension (filtration sur lits de sable, tamis métalliques ou charbon actif). L'élimination de l'azote et du phosphore par voie biologique ou chimique évite la prolifération de végétaux dans les corps d'eau (les lacs, les étangs ou les rivières) et protège la vie aquatique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation floue de type Takagi-Sugeno. Nous avons formulé les problèmes d'identification de la structure d'un model flou type Takagi-Sugeno requiert les étapes préliminaires suivantes :

- 1) Choix des variables de la prémisse
- 2) Identification des paramètres de la prémisse
- 3) Identification des paramètres de la conséquence

Un critère pour la vérification d'une structure a été trouvé. En utilisant ces critères, un algorithme de choix d'une structure de principe a été suggéré. En outre, un algorithme d'identification successive des paramètres de prémisse et un procédé pour trouver les variables consécutives ont été suggérées.

Dans le troisième chapitre, dans un processus d'épuration de l'eau de surface, la décision sur la quantité de PAC à adjoindre à l'eau non traitée est sans doute, la décision la plus importante.

Cette quantité dépend de plusieurs facteurs dont certains ne sont même pas mesurables (température, pH, Alcalinité, quantité de plancton, etc...).

Il est très difficile d'établir une relation mathématique qui permet de déterminer d'une manière systématique la quantité du PAC nécessaire.

Un modèle statique expérimental, représenté par une formule empirique est utilisé dans les stations de traitement, mais les résultats obtenus sont loin de ceux obtenus en présence d'un habile et expérimenté opérateur humain qui prendrait les décisions requises sur la quantité de PAC à ajouter.

Dans cette contribution, on a élaboré un modèle utilisant les techniques floues en essayant de reproduire les décisions de l'opérateur humain sur la quantité de PAC dans le processus d'épuration de l'eau sur une durée de 50 jours.

Le modèle obtenu s'est avéré très efficace et permet une automatisation du procédé d'adjonction du produit PAC dans le processus d'épuration. Ce modèle flou pourrait être une excellente alternative en remplacement du modèle empirique statique utilisé jusqu'à nos jours dans nos stations.

Références et bibliographie

- [1] Mr. Merabti Halim ; Etude des systèmes flous à intervalle ; Mémoire de magistère
Option : Contrôle des systèmes ; université mentouri de Constantine Faculté des sciences
de l'ingénieur Département d'électronique, 2008
- [2] Fang-Ming Yu ; The compact fuzzy filter design via Takagi–Sugeno fuzzy models ;
Expert Systems with Applications journal homepage: www.elsevier.com/locate/eswa
Department of Computer Science and Information Engineering, St. John's University,
Taipei 251, Taiwan, ROC; 2009
- [3] Kamyar Mehran ; Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling for Process Control ; Industrial
Automation, Robotics and Artificial Intelligence (EEE8005)
School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Newcastle University
2008
- [4] M. Hadj sadok, A. Guessoum, H. Salhi, N. Tidjani, “Modélisation floue des actions de
contrôle de la quantité de PAC dans un processus d'épuration des eaux”,
département de chimie industrielle JSTRE 2009.
- [5] Nawel TIDJANI, Wahib NACEUR & Abderrezek GUESSOUM ; Modélisation
Processus D'épuration Des Eaux Par La Logique Floue ; SETIT 2012
- [6] Melle Faiza MEKHALIF ; Réutilisation Des Eaux Résiduelles Industrielles Épurées
Comme Eau D'appoint Dans Un Circuit De Refroidissement ; Mémoire de Magister en
Chimie Option : Pollution Chimique et Environnement ; Université du 20 Août 1955
SKIKDA Faculté des Sciences Département des Sciences Fondamentales ; 2009
- [7] A. MIZI. Traitement des eaux de rejets d'une raffinerie des corps gras région de
BEJAIA et valorisation des déchets oléicoles. Thèse de doctorat. Université de Badji
Mokhtar. ANNABA. 2006.
- [8] Traité l'environnement. Technique de l'ingénieur. Volume G1210.
- [9] Emilian Koller. Traitement des pollutions industrielles: Eau, Air, Déchets, Sols,
Boues. DUNOD. PARIS. Avril 2004.
- [10] F. LARKEM et S. BACEL. Traitements des eaux usées "effluents" de la raffinerie
de SKIKDA. Mémoire d'ingénieur. Université de CONSTANTINE. 2005.

- [11] F. GALAF et S. GHANNAM. Contribution à l'élaboration d'un manuel et d'un site web sur la pollution du milieu marin. Mémoire d'ingénieur d'état. Université HASSAN II. RABAT. ROYAUME du MAROC. 2003.
- [12] Pollution des eaux. Dosage des nitrites. (Internet)
- [13] Brigitte DONNIER. La pollution chimique en méditerrané. Laboratoire. C. E. R. B. O. M. Nice. France.
- [14] Jean RODIER et all. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^{ème} édition. DUNOD. PARIS. 1996
- [15] N. RAMDAN. Etude comparative de la dépollution des eaux de la station de SKIKDA par adsorption sur charbon actif et sur bentonite. Mémoire de magister. Université du 20 Août 1955. SKIKDA. 2006.
- [16] Alain BOTTA. Laurence BELLON. Pollution de l'eau et santé humaine. Laboratoire de biogénotoxicologie et mutagenèse environnementale. Université Euro-Méditerranée TEHYS. Avril 2001.
- [17] F. MECHATI. Etude des paramètres physico-chimique avant et après traitements des rejets liquides de la raffinerie de SKIKA. Mémoire de magister. 2006.
- [18] R. SALGHI. Différentes filières de traitements des eaux. Cours. Ecole nationale des sciences appliquées d'AGADIR. Université IBEN ZOHIR. ROAUME du MAROC. 2006.
- [19] F. BERNIE et J. CORDONNIER. Traitement des eaux. TCHNIP. France. Novembre 1991.
- [20] CHELLE François et DELLALE Moustafa. Festival des sciences de la ville. Séminaire. France.2005.
135
- [21] Jean Paul. BEADRY- Traitement des eaux. Les éditions le griffon d'argile. Québec. Canada .1984

- [22] Traitement physicochimique de la pollution soluble. Technique de l'ingénieur.
Volume G1270.
- [23] Joseph PRONOST, Rakha PRONOST et all. Office internationale de l'eau.
Décembre 2002.
- [24] Inauguration de la nouvelle station d'épuration des eaux usées de cités en cités
de champagne. Octobre 2006. (Internet).
- [25] Camille Baar, Virgine Letevvre et all. Traitement des eaux usées (1). Université
libre de Bruxelles. 2005.
- [26] <http://www.assistancescolaire.com/eleve/5e/physique-chimie/reviser-une-notion/decantation-et-filtration-5pea18>
- [27] R.C. KLIMPEL et R. HOGG. Colloids Surface, (1991).
- [28] BACHOC A., CHEBBO G. Caractérisation des solides en suspension dans les
rejets pluviaux urbains. Journée des Sciences et Techniques de l'Environnement,
Paris, 1992.
- [29] Bernard Pironin. Traitement des eaux.
- [30] Le point de connaissances sur le traitement des eaux usées I. N. R. S. document
technique. Novembre 2004. (Internet).
- [31] R. C. KLIMPEL et R. OGG. Clloids surf. 1991
- [32] Laetitia CITEAU. Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires
des sols contaminés. Unité de science du sol. Versailles et INA-PG. 2004.
- [33] TCHOBANOGLOUS, G., S O E D E R, E.D. Water Quality. 1987.
- [34] AMIRTHARAJAH, A., O'MELLA, C.R. Coagulation Processes:
Destabilization, Mixing, and Flocculation. 1990
- [35] Traitement des eaux. www.univ-ubs.fr.
- [36] Christian Desjardins. Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée.
Mémoire de maîtrise des sciences appliquées. École polytechnique de Montreal 1999.
- [37] JEAN LUC LAURENT. L'assainissement des agglomérations techniques
d'épuration actuelles et évolutions. Les agences de l'eau et le ministère de
l'environnement. France. Avril 1994.

- [38] Victor Hugo Grisales Palacio. Modélisation et commande floues de type Takagi-Sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées. Automatic. Université Paul Sabatier -Toulouse III, 2007. French. <tel-00136382>
- [39] Hung T.Nguyen, Nadipuram R.Prasad, 'FUZZY MODELING AND CONTROL', Selected Works of M.Sugeno, Chapitre 11, 1999.

Annexe A

Exemple :

| implication | prémisse | Conséquence | Tv |
|-------------|----------|---------------------------|-----------------------------|
| | | $y=12+5$ $y=17$ | $.25 \wedge .375$ $=.25$ |
| | | $y=2 \times 12$ $y=24$ | .2 |
| | | $y=3 \times 5$ $y=15$ | .375 |

Tableau 1 : Exemple d'un processus de raisonnement par chaque implication

Supposons que nous avons les trois implications suivantes :

$$R^1 : \text{Si } x_1 \text{ est } petit_1 \text{ et } x_2 \text{ est } petit_2 \text{ alors } y = x_1 + x_2$$

$$R^2 : \text{Si } x_1 \text{ est } grand_1 \text{ alors } y = 2 \times x_1$$

$$R^3 : \text{Si } x_2 \text{ est } grand_2 \text{ alors } y = 3 \times x_2$$

Le tableau 1 montre le processus de raisonnement par chaque implication quand on nous donne $x_1 = 12$, $x_2 = 5$. La colonne "Prémisse" dans le tableau 1 montre les fonctions d'appartenance des ensembles flous "petit" et "grand" dans la prémisse.

La colonne ‘‘Conséquence’’ montre la valeur de y^i calculer par la fonction g^i de chaque conséquence et ‘‘Tv’’ montre la valeur de vérité de $|y = y^i|$. Pour exemple nous avons :

$$\begin{aligned}
 |y = y^1| &= |x_1^0 = \textit{petit}_1| \wedge |x_2^0 = \textit{petit}_2| \\
 &= \textit{petit}_1(x_1^0) \wedge \textit{petit}_2(x_2^0) \\
 &= 0.25
 \end{aligned}$$

La valeur déduite par les implications est obtenu on se référant au tableau 1

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{0.25 \times 17 + 0.2 \times 24 + 0.375 \times 15}{0.25 + 0.2 + 0.375} \\
 &\approx 17.8
 \end{aligned}$$