

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Instrumentation**

**Commande et Modélisation d'un Canal d'irrigation à
Surface Libre**

Présenté par :

MEHALLEL AISSA

Sous la direction de :

Pr. Sedraoui Moussa

Septembre 2020

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu, notre Créateur, qui m'a donné la force, la volonté et la patience tout au long de mes études et d'accomplir finalement ma mémoire

Je tiens ainsi, à exprimer ici tout mon respect et toute ma reconnaissance à mon encadreur Monsieur : Sedraoui Moussa Professeur au sein du département d'électronique et télécommunications, pour sa bienveillance, sa gentillesse, ses encouragements et ses conseils.

Je tiens aussi à remercier grandement le Professeur Vicente Feliu Batlle, directeur du Laboratoire d'Automatique et Robotique de l'Université de Castilla-la Mancha Ciudad Real- Espagne pour leur sympathie et leur collaboration tout au long de mon stage de courte durée.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon frère Saddam Gharib, doctorant au sein de l'université Castilla-la Mancha- Espagne qui m'a aidé pendant mon stage.

Je remercie également tous les membres de jury pour avoir accepté de juger mon travail de master. Je remercie mes parents, mes proches et mes amis qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail.

Finalement, je tiens à ne pas oublier mes remerciements à mes amis et collègues de l'université 8 Mai 1945 Guelma, ainsi que l'ensemble des membres de ma famille pour leur soutien tout au long de ces années d'étude.

Mehallel Aissa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail au meilleur des pères à ma très chère maman qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

À mes frères (EL HADI, Noureddine, Ibrahim, Hicham).

À mes sœurs (F, K).

À mes amis et mes collègues,

À tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

Sans oublier tout le personnel du département d'Électronique et Télécommunications

Toute la promotion instrumentation 2020.

Mehallel Aissa

Liste des figures

Figure 1.1 :	Exemple d'un canal d'irrigation	5
Figure 1.2 :	Représentation du système de contrôle	6
Figure 1.3 :	Contrôle du canal d'irrigation.	7
Figure 1.4 :	Contrôle en aval.	9
Figure 1.5 :	Contrôle en Amont.	9
Figure 1.6 :	Contrôle en boucle ouverte.	10
Figure 1.7 :	Contrôle de boucle fermé.	11
Figure 1.8 :	Linéarisation au voisinage d'un point de fonctionnement.	13
Figure 1.9 :	Représentation graphique de la méthode de <i>Newton</i>	14
Figure 1.10 :	Système à retard pur.....	16
Figure 1.11 :	Retard pur pour la réponse indicielle.	17
Figure 2.1 :	Représentation du système.	20
Figure 2.2 :	Modèle parallèle.	20
Figure 2.3 :	Erreur entre la sortie du modèle et la sortie de système.	21
Figure 2.4 :	Commande en boucle fermée basée sur un modèle du premier ordre à retard pur.	22
Figure 2.5 :	Visualisation des mesures expérimentales d'entrée-sortie.	25
Figure 2.6 :	Visualisation de la quatrième fermeture pour l'identifier le modèle à retard pur.	25
Figure 2.7 :	Visualisation d'une étape de donnée utilisée pour l'identification.	26
Figure 2.8 :	Description de la fenêtre de la bibliothèque « system identification ».	27
Figure 2.9 :	Importation des données temporelle.	28
Figure 2.10 :	Description de chaque sous-fenêtre pour importer les mesures réelles.	28
Figure 2.11 :	Visualisation de l'étape d'importation des données d'entrée-sortie du modèle à faibles signaux.	29
Figure 2.12 :	Visualisation des données d'entrée-sortie du modèle à faibles signaux.	29
Figure 2.13 :	Choix de la structure du modèle de synthèse.	30
Figure 2.14 :	Choix de la forme de la fonction de transfert.	31
Figure 2.15 :	Résultat de l'étape d'estimation des paramètres du modèle souhaité.	31
Figure 2.16 :	Visualisation de résultats de l'identification.	32
Figure 2.17 :	Fonction de transfert obtenue par l'indentification.	32
Figure 2.18 :	Comparaison entre la sortie réelle et la sortie prédite par le modèle souhaité.	33
Figure 2.19 :	Simulation d'un modèle d'identification.	34
Figure 2.20 :	Implémentation du modèle global et comparaison avec les mesures réelles.	34
Figure 2.21 :	Comparaison des deux sorties réelle et prédite.	35
Figure 3.1 :	Prototype du canal d'irrigation.	38
Figure 3.2 :	La boucle de commande du canal d'irrigation.	39
Figure 3.3 :	Système boucle du canal d'irrigation.....	40
Figure 3.4 :	Réponse indicielle du système bouclé par un contrôleur PI.	41
Figure 3.5 :	Simulation d'un système en boucle fermée.	42
Figure 3.6 :	Choix de l'entrée de consigne pour visualiser la dynamique de poursuite.....	42
Figure 3.7 :	Dynamique de poursuite de la consigne imposée par l'utilisateur.	43
Figure 3.8 :	Système de contrôle global du prototype de canal d'irrigation.....	44
Figure 3.9 :	Implémentation d'un contrôleur type Prédicteur de Smith.....	45
Figure 3.10 :	Simulation de prédicteur de Smith.	46
Figure 3.11 :	La réponse à la consigne pour le prédicteur de Smith.	46
Figure 3.12 :	Comparaison entre le correcteur PI et le prédicteur de Smith.	47
Figure 3.13 :	Comparaison des deux réponses fournies par le correcteur PI et le prédicteur de Smith.	47

Sommaire

REMERCIEMENTS	II
DEDICACE	III
LISTE DES FIGURES	IV
SOMMAIRE	V
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 01 : DESCRIPTION DU SYSTEME D'IRRIGATION	3
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 DESCRIPTION DU SYSTEME D'IRRIGATION :	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Les composants d'un système d'irrigation :.....	5
1.2.3 L'objectif du canal d'irrigation :.....	5
1.3 PRINCIPE DE CONTROL DU CANAL D'IRRIGATION :.....	5
1.3.1 Les variables considérées :.....	6
1.4 CONCEPT DE CANAUX.....	8
1.4.1 En Aval « down Stream ».....	8
1.4.2 En Amont « up Stream ».....	8
1.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
1.5.1 Le contrôle en Aval.....	8
1.5.2 Le contrôle en Amont.....	9
1.6 LA LOGIQUE DE CONTRÔLE	9
1.6.1 Le contrôle en boucle ouverte.....	10
1.6.2 Le contrôle en boucle fermée :.....	10
1.7 LE CONTRÔLEUR DE CANAUX	11
1.8 CARACTÉRISTIQUE DE CANAL D'IRRIGATION	11
1.8.1 Linéarisation d'un système non linéaire	12
1.9 MODÈLES LINÉAIRES D'ORDRE ENTIER.....	14
1.10 APPROXIMATION DE PADÉ	15
1.11 DEFINITION D'UN SYSTEME A RETARDS PUR	16
1.11.1 Les sources possibles du retard pur	16
1.12 CONCLUSION.....	17
CHAPITRE 02 : MODÉLISATION ET IDENTIFICATION DU SYSTÈME D'IRRIGATION.....	18
2.1 INTRODUCTION.....	19
2.2 MODELISATION DU SYSTEME D'IRRIGATION A SURFACE LIBRE	19
2.3 MODELE MATHEMATIQUE DU CANAL D'IRRIGATION A SURFACE LIBRE	20
2.3.1 Modèle du premier ordre à retard pur.....	21
2.3.2 Modèle de second ordre à retard pur	22
2.4 IDENTIFICATION PARAMETRIQUE DU MODELE A RETARD PUR	23
2.5 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE D'IDENTIFICATION	24
2.6 EXTRACTION DU MODELE A RETARD PUR VIA LES DONNEES EXPERIMENTALES	24
2.7 PRESENTATION DE LA BIBLIOTHEQUE « SYSTEM IDENTIFICATION » DU LOGICIEL MATLAB.....	26
2.8 IMPORTATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES	27
2.9 CONCLUSION.....	35

CHAPITRE 03 : COMMANDE DU SYSTEME D'IRRIGATION A SURFACE LIBRE	36
3.1 INTRODUCTION.....	37
3.2 PRÉSENTATION DE PROTOTYPE.....	38
3.3 SYNTHÈSE DU CONTRÔLEUR VIA LE MODÈLE DU CANAL.....	40
3.4 IMPLÉMENTATION DU CONTRÔLEUR PI DANS LA BOUCLE DE COMMANDE	43
3.5 COMMANDE PAR PRÉDICTION	44
3.5.1 <i>Prédicteur de Smith</i>	44
3.6 CONCLUSION.....	48
CONCLUSION GENERALE	49
PERSPECTIVES.....	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIE.....	52
RESUME.....	53

Introduction générale

Un canal d'irrigation est un système hydraulique dont l'objectif principal est de transporter l'eau d'une source (barrage et rivière) à différents utilisateurs. La commande de ces systèmes peut poser des problèmes sérieux de point de vue pratique, car ils se caractérisent par des retards purs et des non linéarités inhérentes dans le comportement réel de ces systèmes, de fortes perturbations inconnues et des interactions entre ses grandeurs d'entrées-sorties. L'objectif général de la commande du canal est donc de fournir de l'eau aux différents utilisateurs au bon moment et dans la bonne quantité, en réduisant au maximum les pertes afin de garantir la sécurité de l'infrastructure.

Le problème majeur survenant dans la commande du canal est le débit d'eau, ainsi que le changement des niveaux d'eau à l'intérieur du canal d'irrigation en raison de changements inconnus de la demande en eau dans le canal pendant le cycle d'irrigation, et le résultat est que le débit réel de l'eau prélevée est inconnu. Dans ce cas, il est très difficile de resynthétiser une nouvelle loi de commande pour le canal pour satisfaire les livraisons programmées lorsque l'eau ne connaît pas déjà le débit extrait, et l'état actuel du canal. Pour résoudre ce problème, nous encourageons fortement la modernisation de la gestion des canaux d'irrigation à l'aide de méthodes de contrôle automatisées, commander les canaux d'irrigation les plus importants de la vie qui permettent une bonne utilisation de l'eau et améliorent l'agriculture. Pour cette raison, la motivation de cette mémoire s'articulera autour de deux objectifs principaux :

D'une part, l'étude et la conception d'un modèle à retard décrivant le comportement réel du canal d'irrigation en utilisant l'interfaçage graphique de l'identification du logiciel Matlab. Ce modèle doit décrire le plus précis que possible le transfert reliant la grandeur régulant et la grandeur à régler, c'est-à-dire un algorithme qui calcul le débit et le niveau d'eau dans la section transversale du canal en fonction de l'ouverture et la fermeture de la vanne qui assure l'alimentation de ce canal. D'un autre côté, l'utilisation d'une méthode de synthèse assurant une conception adéquate du contrôleur stabilisant la boucle de commande du canal. Ce contrôleur doit fournir des ouvertures et des fermetures optimales de la porte en temps réel pour rendre un niveau constant dans le canal ce qui stabilise le système d'irrigation en présence des incertitudes de modélisation et l'effet de bruits de mesures. De cette façon, l'eau peut répondre aux véritables besoins en eau du canal.

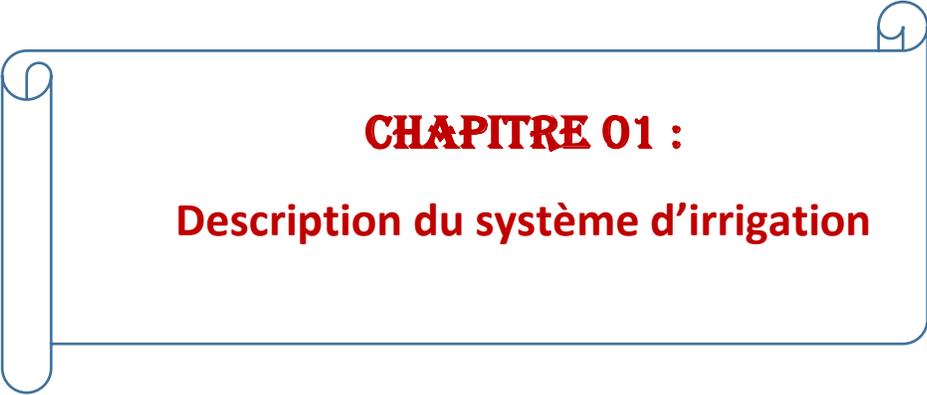
Ce manuscrite est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre s'articule autour de la description du système de canal, en mettant les équations non linéaires de leur dynamique, comment linéariser ce comportement non linéaire. Par la suite, nous allons présenter un bref aperçu sur les méthodes de linéarisation telles que la méthode de Newton, ..., etc., la nécessité d'introduire des retards purs dans la modélisation, l'effet du retard pur sur la stabilité du système bouclé, ainsi que l'approximation du retard basée sur la méthode de Padé.

Le deuxième chapitre sera pour but de la modélisation du comportement non linéaire du canal autour d'un régime de fonctionnement préfixé par l'utilisateur en utilisant un modèle de premier ordre avec retard pur. Ensuite, l'identification des paramètres de ce modèle en l'introduisant les différents critères tels que l'erreur quadratique moyenne (MSE) et l'erreur quadratique intégrale (ISE). Puis on passera à l'utilisation de l'interface graphique de la bibliothèque d'identification du Matlab pour modéliser le comportement réel du canal. Dans cette partie, on utilisera les données expérimentales pour développer un modèle adéquat dont la structure est préalablement disponible dans l'interface graphique fourni par la commande « *ident* » de Matlab.

Le troisième chapitre a pour but de synthétiser des contrôleurs à savoir le contrôleur proportionnel- intégral PI pour la commande du canal. Ensuite, on passera au principe de prédicteur de Smith pour comparer ses commandes avec celles fournies par des contrôleurs synthétisés via l'approximation a priori du retard pur par la méthode de Padé.

Enfin, nous tirons quelques conclusions et perspectives sur la gestion des canaux d'irrigation ainsi que les différentes méthodes de contrôles utilisés pour leur commande.



CHAPITRE 01 :
Description du système d'irrigation

1.1 Introduction

L'eau est un facteur majeur de la vie. Pour cela nous avons besoin de l'eau, que ce soit dans les zones industrielles ou agricoles, domestique. Par conséquent, nous avons également besoin d'un écoulement naturel de l'eau vers la nature pour conserver la faune et la biodiversité, conserver le paysage, cultiver les terres arides en cas de pénurie la quantité de pluie.

L'eau est une ressource renouvelable, mais elle n'est pas distribuée uniformément dans le temps ou dans les régions. Depuis l'antiquité, les humains ont utilisé des techniques d'ingénierie pour la conception des canaux. Ces derniers doivent permettre le transport de l'eau sur de longues distances, que ce soit pour l'irrigation, l'eau potable ou l'eau domestique, et pour maintenir la continuité de l'eau.

La conception d'un canal d'irrigation permettant de fournir de l'eau à différents utilisateurs au bon moment et en bonne quantité. Un canal d'irrigation est une voie navigable ouverte qui vise à déplacer l'eau d'un endroit à un autre.

Un canal d'irrigation est un système hydraulique dont le principal objectif est de transférer l'eau d'une source (barrage et rivière) vers différents utilisateurs, mais la gestion de système est rendue délicate par l'étendue spatiale des systèmes considères, par le temps de retard important et par le caractère non linéaire de leur fonctionnement hydraulique. A cet effet, le contrôle automatique du canal d'irrigation est donc nécessaire pour conserver la quantité de l'eau et améliorer gestion de l'eau.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par une description détaillée du système d'irrigation. Ensuite, de présenter les structures de contrôle du canal d'irrigation et leur principe de fonctionnement. Enfin, nous allons rappeler les méthodes de linéarisation du comportement non linéaire qui définissant le système d'irrigation.

1.2 Description du système d'irrigation :

1.2.1 Définition

L'irrigation peut être définie comme le processus d'approvisionnement en eau par moyens artificiels pour les champs agricoles et pour la production agricole. Si l'eau disponible pour les plantes à partir des précipitations n'est pas suffisante, il faut compléter par de l'eau d'irrigation. Pour atteindre à cet objectif, un système d'irrigation est nécessaire à développer qui implique la planification, la conception, la construction, l'exploitation et l'entretien de divers ouvrages d'irrigation à savoir :

- **Source** : rivière, réservoirs, Barrages
- **Structure de contrôle** : régulateurs en chef
- **Système de distribution** : canaux d'irrigation

La figure 1.1 présente un exemple d'un canal d'irrigation

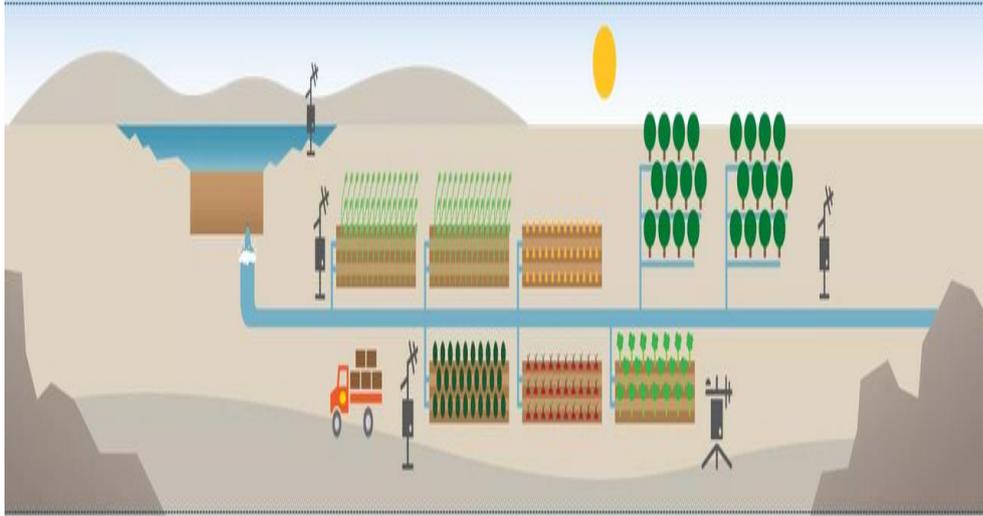


Figure 1. 1: Exemple d'un canal d'irrigation.

1.2.2 Les composants d'un système d'irrigation :

Le système d'irrigation est constitué de plusieurs composants pour le bon fonctionnement. On peut citer par exemple : le barrage, la pompe électrique, le filtre, l'adaptateur, le régulateur de pression et la protection contre le reflux.

1.2.3 L'objectif du canal d'irrigation :

L'irrigation est l'application de quantités contrôlées d'eau aux plantes aux intervalles nécessaires. L'irrigation aide à faire pousser des cultures agricoles, à maintenir les paysages et à végétaliser les sols perturbés dans les zones sèches et pendant les périodes de précipitations inférieures à la moyenne.

1.3 Principe de control du canal d'irrigation :

Nous définissons un système de contrôle comme un arrangement d'algorithmes et de composants électroniques, électriques et mécaniques qui commande ou dirige la régulation d'un système de canal. A cet effet, le système de contrôle est responsable du contrôle des structures d'un canal sur la base des informations extraites des mesures de ce système. Le terme « contrôle de canal » décrit les étapes nécessaires pour garantir le niveau d'eau et le débit requis le long du canal [1].

Les conditions de débit sont contrôlées en ajustant les positions des vannes. Les conditions des canaux dépendent de l'ajustement des variables d'action (ouvertures de vannes, débit), qui fournissent un certain contrôle sur le système de canaux. Certaines variables sont facilement ajustables tandis que d'autres sont plus compliquées ou ne peuvent pas être ajustées. L'algorithme est conçu pour traiter les informations d'entrée des capteurs, exécuter la fonction de comparateur et calculer la sortie appropriée vers l'actionneur. L'entrée correspond aux quantités observées, mesurées ou prédites, la sortie est une action de contrôle.

Il existe de nombreux critères permettant de caractériser les algorithmes de contrôle des canaux, tels que les variables de contrôle (débit, profondeur, ouverture de la vanne), les interactions entre les contrôleurs locaux (locaux, centralisés, etc.), les exigences de communication, la conception technique, les alarmes et la localisation des mesures le long du canal. De plus, différents algorithmes de contrôle pour la régulation des canaux d'irrigation ont été développés et appliqués à travers le monde pendant ces dernières années. Chaque algorithme peut être caractérisé selon plusieurs critères, parmi lesquels : les **variables considérées** (variables d'action, variables mesurées et variables contrôlées), la logique de contrôle (type et direction), la conception du système de contrôle et le travail de mise en œuvre sur le terrain [1].

1.3.1 Les variables considérées :

Dans la théorie du contrôle, un système est généralement représenté comme dans la Figure 1.2. Dans ce cas, l'acronyme " U " représente les grandeurs d'action de contrôle telles que les ouvertures de vanne, les incréments d'ouvertures de vanne, la décharge. Ces variables ont pour but de modifier l'état du système. De plus, « Y » représente les grandeurs contrôlées telles que le niveau d'eau, le débit, le volume, ..., etc.

Dans un algorithme de contrôle, il existe souvent les trois types de variables à savoir:

- Les variables contrôlées
- Les variables mesurées
- Les variables d'action

La Figure 1.2 représente un système de contrôle ayant toutes les variables suscitées.

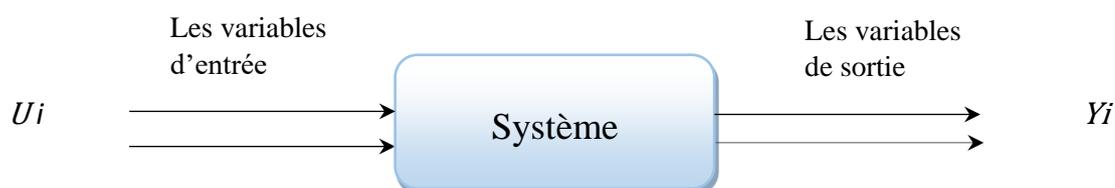


Figure 1. 2 : Représentation du système de contrôle.

1.3.1.1 Les variables contrôlées Y :

Les variables contrôlées sont des grandeurs mesurables fournies par le système d'irrigation à commander. En général, les variables contrôlées sur un canal d'irrigation peuvent être l'un des trois types suivants : débits, niveaux, volumes d'eau. Selon la terminologie utilisée dans la modélisation d'un système physique, les variables contrôlées sont souvent localisées à certaines sections transversales du canal.

- **Control de niveau d'eau :**

Le niveau d'eau peut être facilement mesuré dans les canaux, il s'agit donc généralement de la variable contrôlée. Il peut être contrôlé entre l'amont et l'aval en long du canal (voir la figure 1.3).

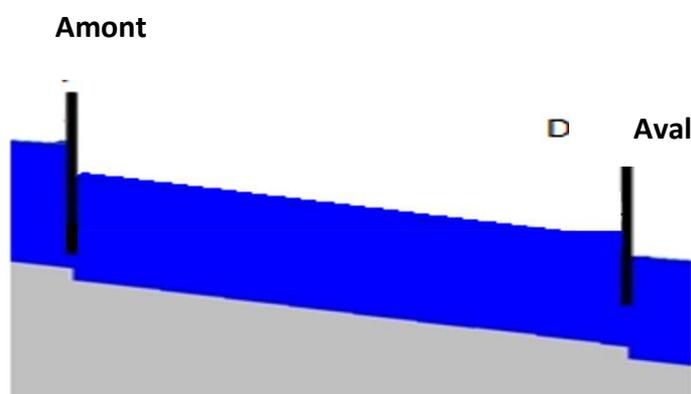


Figure 1. 3 : Contrôle du canal d'irrigation.

1.3.1.2 Les variables mesurées :

Les variables mesurées sur les canaux d'irrigation sont généralement les niveaux d'eau. Ce dernier peut être mesuré avec un équipement spécifique (généralement basé sur la mesure d'une ou plusieurs vitesses d'écoulement, avec une hélice, un ultrason ou un appareil électromagnétique). Le fonctionnement du canal à contrôle automatique dépend de la collecte de données sur le niveau d'eau.

1.3.1.3 Les variables d'action de contrôle U :

Les variables d'action de contrôle U nécessitent des équipements mécaniques tels que des vannes et des pompes. Elles sont généralement des ouvertures de la vanne ou des incréments d'ouvertures de vannes. Les ouvertures des vannes ont l'avantage de prendre en compte la dynamique complexe liant cette ouverture de la vanne avec le débit local et les niveaux d'eau en aval et en amont.

Dans ce qui est suit, et avant de définir les modes de fonctionnement, nous devons introduire plusieurs concepts tels que le fonctionnement du canal et le contrôle du canal. Cela permet de rendre les méthodes d'opération plus compréhensible.

1.4 Concept de canaux

Le concept de fonctionnement des canaux, établi par les normes de fonctionnement du système de canaux, est défini comme suit :

1.4.1 En Aval « down Stream »

Le concept d'exploitation en aval s'applique aux systèmes de canaux qui sont principalement déterminés par la demande et sont généralement associés aux systèmes de distribution. Ces systèmes acheminent l'eau d'une seule source, comme un réservoir de stockage, vers un certain nombre de points d'utilisation individuels, et ils sont associés à l'irrigation [1].

1.4.2 En Amont « up Stream »

Le concept de fonctionnement en amont s'applique aux systèmes de canaux qui sont principalement orientés vers l'alimentation et le concept est généralement associé aux systèmes de capteurs. Ces systèmes acheminent l'eau de plusieurs sources individuelles, comme les drains d'entrée de surface d'une tempête de pluie en amont, vers un seul point de dérivation situé en aval [1].

1.5 Principe de fonctionnement

Le concept de contrôle détermine comment les structures de contrôle du canal sont ajustées pour satisfaire le concept de fonctionnement du canal. Il est défini par l'emplacement des informations nécessaires qui assurent le fonctionnement de la structure de commande. Parmi lesquels, on peut citer :

1.5.1 Le contrôle en Aval

Les ajustements de la structure de contrôle sont basés sur des informations d'une piscine en aval. De plus, les informations requises pourraient être mesurées par un capteur ultrason situé en aval. Ce dernier mesure le niveau de l'eau puis convertit les mesures vers les ordinateurs pour traiter et conserver le niveau de l'eau d'un canal (voir la Figure 1.4).

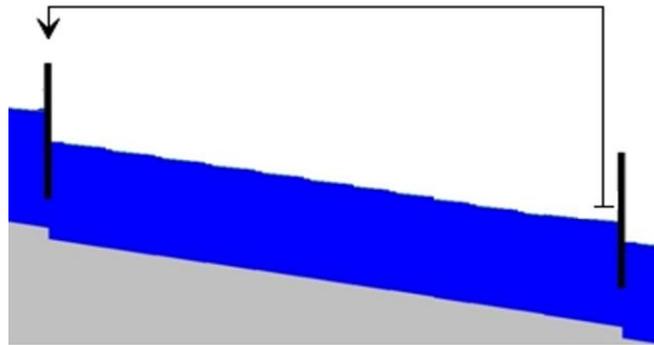


Figure 1. 4: Contrôle en aval.

1.5.2 Le contrôle en Amont

Les ajustements de la structure de contrôle sont basés sur une piscine en amont, les informations requises pourraient être mesurées par un capteur ultrason situé en amont de la position de la vanne / régulateur. Dans ce cas, le capteur mesure le niveau de l'eau en amont puis convertit les mesures vers les ordinateurs pour commande l'ouverture de la vanne (voir la Figure 1.5).

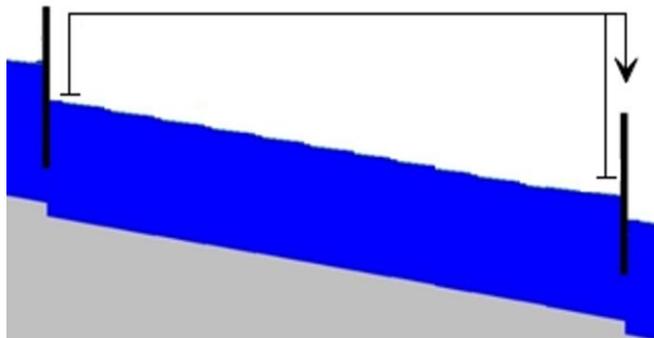


Figure 1. 5: Contrôle en Amont.

Une fois que nous avons défini le concept de contrôle et le concept d'opération, les méthodes de contrôle seront détaillées dans la section ci-dessous.

1.6 La logique de contrôle

La logique de contrôle dépend du type d'informations utilisées pour calculer l'action de contrôle variables du système. Pour définir la logique du concept de contrôle, nous parlerons sur le contrôle sur la « boucle fermée », également appelée « *feedback control* » ou sur le contrôle en « boucle ouverte » également appelée « *feedforward control* ».

1.6.1 Le contrôle en boucle ouverte

Le contrôle en boucle ouverte est effectué si la variable contrôlée est ajustée sans comparaison avec la réponse réelle ou les conditions réelles souhaitées. Un exemple de contrôle en boucle ouverte est un signal lumineux, les feux de circulation répondent à des intervalles de temps spécifiques quelles que soient les conditions de circulation réelles [2]. Dans ce cas, l'action de contrôle « U » est calculée suivant la dynamique du système qui est souvent modélisée par un modèle mathématique linéaire ou non linéaire. L'entrée de consigne « Y_c » pour les demandes instantanées en eau des agriculteurs doit être connues et fixée à l'avance par l'utilisateur.

La commande en boucle ouverte est généralement insuffisante en raison d'erreurs de modèle, d'erreurs d'estimation de perturbation et de perturbations inconnues. Elles peuvent être donc appliquées à toutes les variables contrôlées à savoir le débit, le niveau et le volume d'eau. La figure 1.6 représente le schéma fonctionnel de la commande en boucle ouverte.

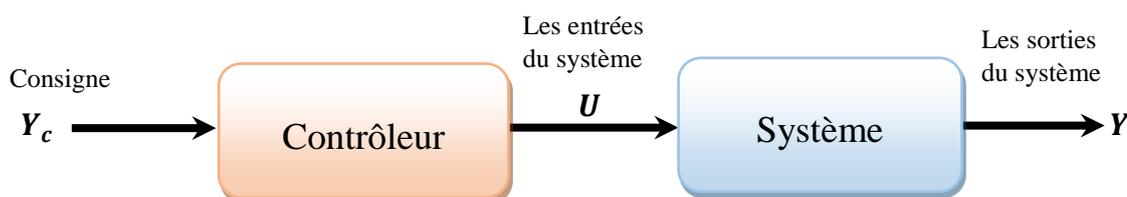


Figure 1. 6 : Contrôle en boucle ouverte.

1.6.2 Le contrôle en boucle fermée :

Le contrôle en boucle fermée est effectué lorsque la variable contrôlée est mesurée et comparée à un point de consigne représentant la performance souhaitée, Tout écart par rapport au point de consigne est envoyé au système de contrôle, afin qu'il puisse définir les actions de contrôle pour réduire l'écart de la variable contrôlée par rapport à la référence. Dans la commande en boucle fermée, la variable d'action de commande « U » est calculée à partir de l'erreur mesurée entre la variable réelle contrôlée « Y » et sa consigne correspondante « Y_c » (voir la figure1.7). Les perturbations « P », même inconnues, sont prises en compte indirectement par leur effet sur la sortie « Y » du système.

En théorie du contrôle, ce concept est essentiel car il relie une action de contrôle « U » à une variable contrôlée « Y ». Les boucles fermées peuvent être appliquées à toutes les variables contrôlées à savoir le débit, le niveau et le volume d'eau.

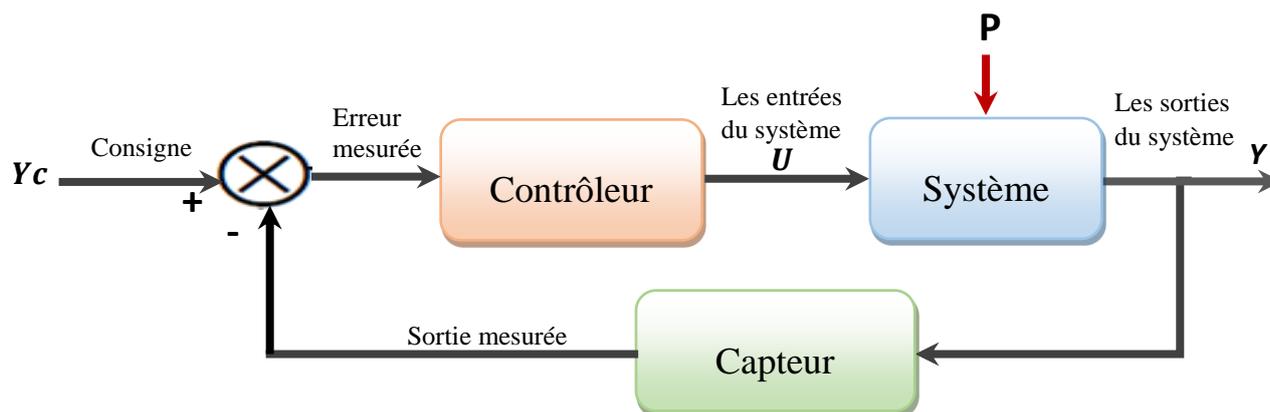


Figure 1. 7 : Contrôle de boucle fermée.

1.7 Le contrôleur de canaux

Le terme « contrôle des canaux » décrit les étapes nécessaires pour assurer le niveau d'eau et le débit requis le long d'un canal. Il est réalisé par la manipulation de variables (ouvertures de la vanne, débits de pompe) afin d'obtenir les conditions souhaitées dans le canal. Ces conditions sont contrôlées en ajustant le volume d'eau pompé *INPUT/OUTPUT* du canal, en ajustant la position de la vanne et en régulant les débits à travers les branchements de livraison. Lorsqu'un canal ayant un débit constant, son contrôle est facile, mais des problèmes apparaissent en raison des changements de débit à certains points.

L'état du canal peut varier de façon imprévisible en raison de perturbations qui sont considérées comme appartenant à l'environnement extérieur du système (ruissellement produit par les événements de pluie, pertes de canaux dues à l'infiltration, taux de participation inconnu). Par conséquent, si nous voulons garder le canal sous contrôle dans ces circonstances, il est nécessaire d'utiliser des contrôleurs comme le contrôleur Proportionnel-Intégral-Dérivé PID, contrôleur prédictif, ..., etc.

1.8 Caractéristique de canal d'irrigation

La commande d'un niveau d'eau d'un canal d'irrigation à surface libre est assurée par une tension alimentant une électrovanne installée au début de ce canal. A cet effet, le but de la commande est de transmettre de l'eau de sa source amont (le barrage, la rivière) à ses utilisateurs finaux aval (des agriculteurs).

Il est à noter ici que le comportement réel de ce système physique est fortement non linéaire et contient un retard pur provoquant en général une instabilité de la boucle de commande. Pour concevoir une loi de commande répondant au cahier de charge, nous devons faire une

linéarisation a priori du système autour de son point de fonctionnement. Cette étape est souvent assurée par plusieurs méthodes existant dans la littérature.

1.8.1 Linéarisation d'un système non linéaire

Pour un système d'irrigation à surface libre, la linéarisation est une approximation linéaire d'un comportement non linéaire qui doit être valide dans une petite région autour d'un point de fonctionnement. A cet effet, les équations de Saint-Venant sont souvent considérées comme un moyen efficace de modéliser la dynamique des systèmes de canaux hydrauliques. Ce sont des équations différentielles et se caractérisent par sa non-linéarité. Elles expriment donc la conservation de Momentum et masse d'un écoulement canalaire unidimensionnel [2]. Les méthodes de simplifications et d'approximations des équations de Saint-Venant peuvent être divisées en quatre catégories à savoir : empiriques, linéarisées, hydrologiques et hydrauliques [2]:

- *Les méthodes empiriques* sont basées sur une large collection de données observées pour un tronçon discret d'une rivière ou d'un canal et ne sont applicables que pour le tronçon ;
- *Les méthodes linéarisées* simplifient les équations de Saint-Venant en négligeant les termes non linéaires ;
- *Les méthodes hydrologiques* utilisent l'équation de conservation de la masse et une relation entre le stockage et le rejet ;
- *Les méthodes hydrauliques* ajoutent l'équation de conservation de la quantité de mouvement.

Pour linéariser le comportement non linéaire d'un système d'irrigation, les variables sont redéfinies sous formes de petites variations. Si on note (x_0, y_0) le point de fonctionnement, on pose les variables δx et δy telles que : $x(t) = x_0 + \delta x(t)$ et $y(t) = y_0 + \delta y(t)$. Pour représenter le modèle linéarisé, on définit de nouvelles variables centrées sur le point de fonctionnement telle que : $\delta x(t) = x(t) - x_0$ et $\delta y(t) = y(t) - y_0$

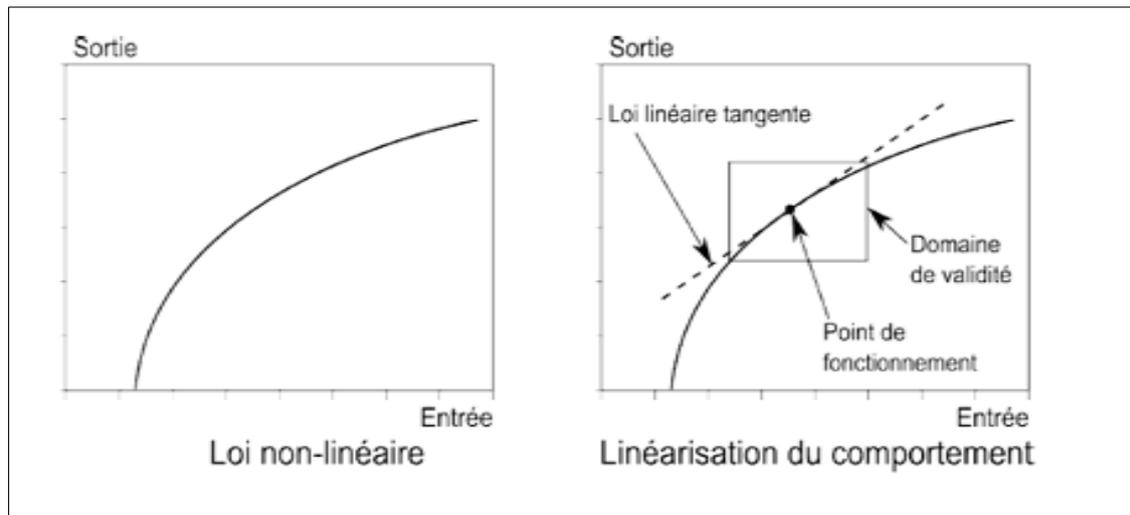


Figure 1. 8: Linéarisation au voisinage d'un point de fonctionnement.

1.8.1.1 Notion du point de fonctionnement :

Un point de fonctionnement est un point d'équilibre pour les grandeurs physiques du système au cours de son fonctionnement. Au point de fonctionnement, les dérivées sont toutes nulles et les équations (non linéaires) conduisent à un état stable des grandeurs. Dans ce travail, on s'intéresse généralement au point de fonctionnement nominal, c'est-à-dire, le point de fonctionnement dans lequel on désire faire la commande.

1.8.1.2 L'objectif de la linéarisation :

La linéarisation est une opération très utile dans les applications d'analyse de modèle et de la conception de contrôle. Elle permet de :

- Tracer la réponse de Bode à partir du modèle Simulink.
- Évaluer les marges de stabilité de la boucle en calculant la réponse en boucle ouverte.
- Analyser et comparer la réponse du système près de différents points de fonctionnement.
- Synthétiser du contrôleur stabilisant la boucle de commande.
- Analyser la stabilité en boucle fermée.

1.8.1.3 Méthode de Newton pour la linéarisation :

La méthode de *Newton* est une méthode d'analyse numérique permettant de trouver les approximations successives des zéros d'une fonction à valeurs réelles [2]. Cette méthode consiste à tracer la droite sur la courbe de la fonction non linéaire et calculer la tangente. Cette méthode est donc la plus utilisée pour la linéarisation des équations différentielles non linéaires. Son principe est donné comme suit :

Considérons une fonction $f(x)$, et on cherche de la variable x tel que : $f(x) = 0$. En commençant tout d'abord par une valeur initiale x_0 qui est assez proche de x en extrapolant la tangente en x_0 jusqu'à son intersection avec l'axe d'abscisse OX, on continue jusqu'à obtenir une valeur de x tel que : $f(x) = 0$. La figure 1.9 donne une description graphique de la méthode *Newton*.

D'après la figure 1.9, on peut écrire :

$$tg = f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_1)}{x_0 - x_1} = \frac{f(x_0)}{x_0 - x_1} \quad (1.1)$$

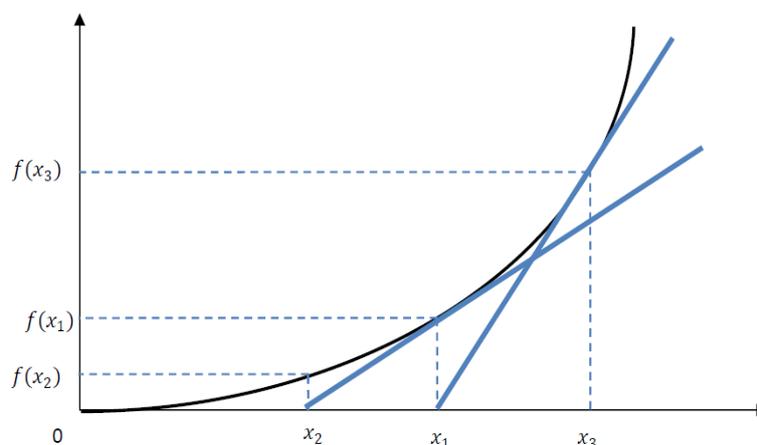


Figure 1. 9: Représentation graphique de la méthode de *Newton*.

A partir de l'équation (1.1), on peut écrire les termes suivants :

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (1.2)$$

1.9 Modèles linéaires d'ordre entier

Les équations de Saint-Venant sont souvent linéarisées autour des régimes d'écoulement afin de développer des systèmes de contrôle. Les paramètres de ces équations différentielles linéaires résultantes changent généralement en fonction du régime de fonctionnement. Les paramètres nominaux et leurs plages de variation sont donc estimés afin d'inclure toutes les dynamiques possibles dans un modèle global. Afin d'obtenir un tel modèle, des tests incrémentaux sont effectués autour de chaque régime d'écoulement possible [2]. Ces tests permettent d'obtenir la fonction de transfert qui relie la commande de l'ouverture de la vanne amont $u(t)$ avec le niveau d'eau en aval du canal principal $y(t)$. Les modèles de premier ordre retardés résultant de la linéarisation autour d'un régime de fonctionnement spécifié sont souvent utilisés pour décrire ces dynamiques. Ils sont donnés par l'équation 1.3 comme suit :

$$T_i \cdot D \cdot \Delta y(t) + \Delta y(t) = K_i \cdot \Delta U(t - L_i) \quad (1.3)$$

Avec D est l'opérateur dérivé, K_i est le gain statique, T_i est la constante de temps et L_i est le retard pur. Ce type de modèles linéaires d'ordre entier sera représenté par la fonction de transfert suivante :

$$G_i(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K_i \cdot e^{-L_i \cdot s}}{1 + T_i \cdot s} \quad (1.4)$$

Ensuite, on utilise une méthode d'estimation récursive des paramètres et de validation du modèle pour identifier les paramètres du modèle souhaité. De plus, un modèle du second ordre a été développé pour approximer avec précision le comportement dynamique d'un véritable canal d'irrigation principal. Un tel modèle reproduisait précisément la dynamique du canal d'irrigation considéré, même avec des données qui n'avaient pas été utilisées dans la procédure d'ajustement, et malgré certaines dynamiques non modélisées. Il est représenté par la fonction de transfert :

$$G_s(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = \frac{A \cdot e^{-L_i \cdot s}}{(1 + T_1 \cdot s)(1 + T_2 \cdot s)} \quad (1.5)$$

Le terme $e^{-L_i \cdot s}$ est préalablement approximé par un transfert irrationnel stable d'ordre m où ses paramètres sont obtenus par la méthode de *Padé*, qui est disponible dans la bibliothèque du *Matlab*. On aura donc la structure générale suivante :

$$e^{-\theta \cdot s} = \frac{1 + \sum_{k=1}^m \left\{ \left(\frac{-\theta \cdot s}{2} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \right\}}{1 + \sum_{k=1}^m \left\{ \left(\frac{\theta \cdot s}{2} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \right\}} \quad (1.6)$$

1.10 Approximation de Padé

Cette approximation permis d'approximation le retard pur par une fonction de transfert rationnelle, ce qui simplifie l'analyse et la conception de système a retard. Cette approximation assurant le traitement du système a retard comme celui d'ordre élevé et sans retard.

$$e^{-sh} = \frac{Nr}{Dr} \quad (1.7)$$

Par exemple, l'approximation du premier ordre est donnée par :

$$e^{-sh} = \frac{1 - \frac{hs}{2}}{1 + \frac{hs}{2}} \quad (1.8)$$

Cependant, l'approximation du deuxième ordre est donnée par :

$$e^{-sh} = \frac{1 - \frac{hs}{2} + \frac{h^2s^2}{12}}{1 + \frac{hs}{2} + \frac{h^2s^2}{12}} \quad (1.9)$$

1.11 Définition d'un système à retards pur

Un certain nombre de systèmes physiques peuvent être modélisés par une fonction de transfert incluant un retard pur, ou temps mort. Ces retards peuvent avoir une origine physique : prenons l'exemple d'une réaction chimique, il existe un retard intrinsèque dû à la dynamique du mélange. Ces retards peuvent se retrouver dans d'autres situations ; bien souvent celui-ci peut être associé à un transport de matière : transport de l'eau dans une conduite avant d'arriver au niveau du capteur, mais la présence des retards rend la conception analyse et contrôle des systèmes beaucoup plus complexes. Il est important de noter qu'un retard apparait dans une fonction de transfert ayant une réalité physique. Ce retard permet alors de décrire une partie de la dynamique du système d'une manière plus simple. Pour un retard donné avec une valeur de $\theta > 0$, la sortie $y(t)$ correspondante à l'entrée $u(t)$ est donnée par : $y(t) = u(t - \theta)$. La Figure 1.10 présente l'effet du retard pur sur la réponse du système à commander.



Figure 1. 10: Système à retard pur.

Par conséquent, la fonction de transfert d'un élément de retard est donnée par :

$$H(s) = \frac{Y(P)}{X(P)} = e^{-\theta s} \quad (1.10)$$

1.11.1 Les sources possibles du retard pur

Les processus peuvent impliquer le transport de matières ou de fluides sur de longues distances. Le capteur de mesure peut mettre beaucoup de temps avant de fournir l'information à l'organe de commande. Le contrôleur peut avoir besoin quelques temps à développer le signal

de commande. Pour le cas d'une entrée d'échelon, la réponse du système à retard est illustrée dans la figure 1.11.

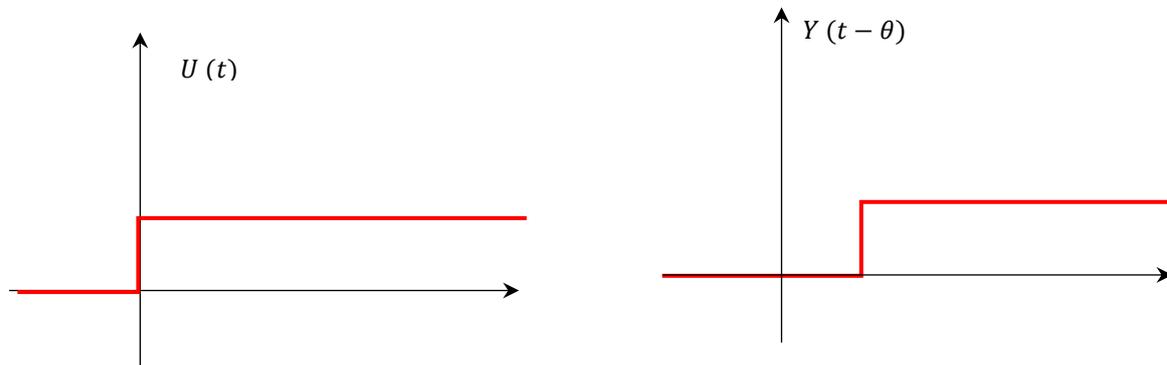


Figure 1. 11: Retard pur pour la réponse indicielle.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les systèmes d'irrigation à surface libre. Après avoir rappelé la définition du système d'irrigation et leurs composants principaux, nous avons présenté le principe de contrôle de système d'irrigation et leur principe de fonctionnement, les différents types de contrôle de canaux ainsi que les méthodes de linéarisation du système non linéaire.

Au cours de chapitre suivant, nous allons donc pouvoir détailler la technique de modélisation et d'identification de système d'irrigation. Cette modélisation permettra de développer un modèle linéaire assurant le fonctionnement correct du système au voisinage de son point d'équilibre. C'est une étape indispensable pour synthétiser le contrôleur nécessaire assurant la stabilité de la boucle de commande en présence des incertitudes de modélisation et d'autres perturbations fournies par l'environnement extérieur.



CHAPITRE 02 :
Modélisation et identification du système
d'irrigation

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation et l'identification paramétrique du modèle linéaire à retard pur assurant la bonne description du comportement réel du canal d'irrigation à surface libre existant sous forme d'un prototype dans le laboratoire de l'université Castilla-La-Mancha, Espagne. Cette modélisation consiste à trouver le transfert linéaire reliant le niveau d'eau, considérée comme sortie à régler, et l'ouverture et la fermeture d'une électrovanne qui est pilotée via une tension d'alimentation en courant continu. De plus, l'identification paramétrique du modèle mathématique simulant le comportement réel du canal est assuré par l'outil du Matlab en utilisant les mesures d'entrées-sorties enlevées durant mon stage de courte durée.

Pour effectuer la commande et le réglage d'un système suscité, il est important de connaître le modèle adéquat et donc les relations mathématiques existant entre la grandeur réglant et la grandeur réglée tout en assurant la bonne minimisation de l'écart produit par la comparaison entre la sortie prédite par le modèle et celle enregistrée via le système réel. A cet effet, l'objectif principal de la modélisation de processus est de définir les actions de contrôle à l'aide des données d'entrée d'un modèle informatique, définissant aussi que possible la dynamique réelle du canal qui peut être correctement approximée par les équations de Saint-Venant ou par une autre approche hydraulique et le modèle mathématique d'une structure de contrôle.

Dans ce chapitre, nous effectuerons une estimation d'un modèle linéaire à retard pour un canal d'irrigation à surface libre. Ce dernier permettra la synthèse du contrôleur stabilisant la boucle de commande. Le système proposé dans ce travail est généralement caractérisé par des temps de retards, des comportements non-linéaires, des perturbations inconnues fortes et des interactions entre ses grandeurs d'entrée-sortie choses qui rendent la phase de synthèse très compliquée du point de vue pratique [3].

2.2 Modélisation du système d'irrigation à surface libre

La modélisation est la représentation du comportement réel d'un système physique par un modèle mathématique plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un modèle de connaissance ou de représentation donnée sous forme d'une fonction de transfert ou d'un modèle d'état.

La modélisation d'un processus consiste à trouver un modèle dont le comportement dynamique se rapproche à celui du processus. Ce modèle sera utilisé pour effectuer des prédictions de la sortie du processus, ou pour l'apprentissage d'un contrôleur, ou encore pour simuler le processus au sein d'un système de commande [4]. La modélisation a pour but de chercher une représentation mathématique susceptible de se comporter comme le système

physique, si le modèle et le processus réel sont soumis à la même sollicitation d'entrée [4]. Un modèle d'un système traduit par les relations mathématiques qui lie les variables mesurées d'entrée \mathbf{u} et celles de sortie \mathbf{y} . Pour notre système du canal d'irrigation, on considère que les variables mesurées d'entrée \mathbf{U} sont l'ouverture de la vanne et les variables de sortie \mathbf{Y} sont la hauteur de l'eau dans canal d'irrigation.

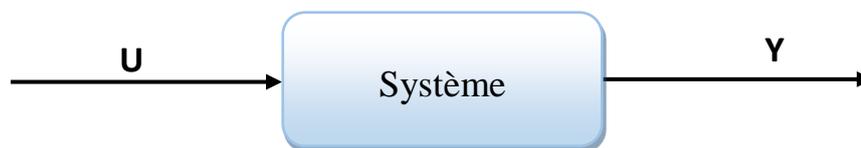


Figure 2. 1: Représentation du système.

2.3 Modèle mathématique du canal d'irrigation à surface libre

Le modèle mathématique est souvent développé à partir des données expérimentales en excitant le système réel par des entrées aléatoires et en estimant des sorties prédites \hat{y} qui ressemblent le plus possible les sortie réelles y . Si le modèle et le système réel ont alors la même entrée, on appelle modèle parallèle par contre dans le cas où le modèle calculé à partir de la sortie y , un vecteur \hat{u} dont on souhaite qu'il ressemble le plus possible aux entrées u du système, on appelle modèle série ou inverse. Dans ce travail, nous allons nous intéresser que par le modèle parallèle dont l'objectif est de minimiser l'écart de modélisation dans chaque pas d'échantillonnage (voir la Figure 2.2).

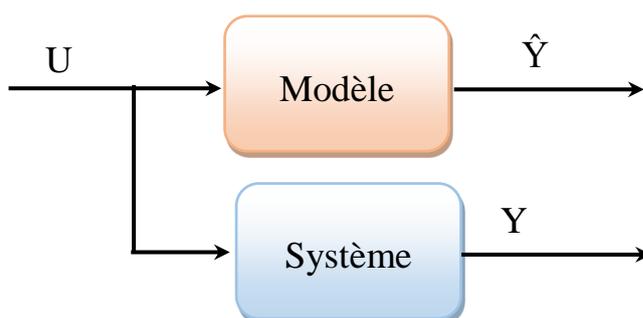


Figure 2. 2: Modèle parallèle.

Le modèle de type parallèle, soumis aux mêmes entrées et aux mêmes conditions initiales que le système, on appelle alors erreur de sortie, la différence entre la sortie du système et celle du modèle. L'erreur de sortie peut s'écrire sous la forme :

$$Erreur = \hat{y}(t) - y(t) \quad (2.1)$$

Le plus souvent, on souhaite que cette erreur de sortie soit aussi proche que possible de zéros, l'échelle de valeur qui sera utilisée pour effectuer la comparaison peut prendre la forme d'une fonction scalaire $J(\theta)$ appelée « critère ». Le choix du critère doit traduire le but fixé par la modélisation quelque soit le critère choisi, il convient ensuite de l'optimiser.

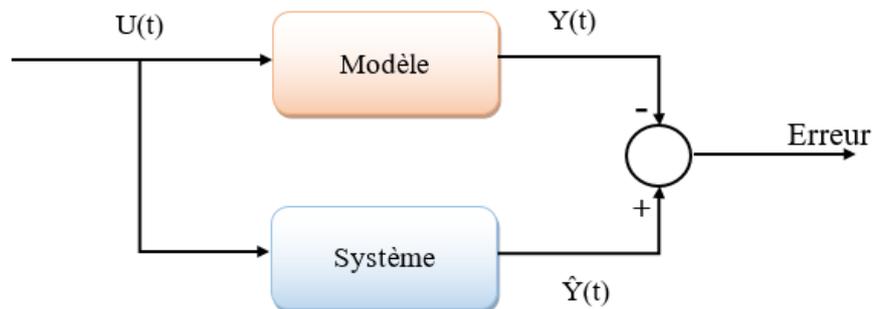


Figure 2. 3: Erreur entre la sortie du modèle et la sortie de système.

L'erreur dans ce cas est la différence entre la « vrai » réponse du processus et la sortie du modèle de prédiction. Sur la base de cette comparaison, il existe plusieurs critères qui assurent le développement des modèles mathématiques très efficaces les uns que les autres. Parmi de ceux-ci on peut citer :

1. **L'Erreur Quadratique Intégrale (ISE)** : Il est utilisé pour les processus avec de grandes erreurs qui existent pendant une courte période d'échantillonnage.
2. **L'erreur quadratique Moyenne de (MSE)** : Il est le critère quantitatif le plus utilisé pour comparer les valeurs calculées et celles observées de modelés.

$$MSE = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.2)$$

y_i Représentent les sorties mesurées via le système réel. \hat{y}_i représentent les sorties prédites par le modèle et N représente le nombre total des données utilisées dans l'estimation des paramètres.

2.3.1 Modèle du premier ordre à retard pur

Le modèle du premier ordre plus un retard pur, appelé dans la littérature par FOPDT (*First Ordre Plus Dead Time*). Les modèles de ces systèmes ont reçu une grande attention en raison de l'utilisation répandue dans les techniques de réglage des contrôleurs PID [4, 5]. De plus, des modèles de premier ordre à retard sont utilisés pour représenter le comportement de nombreux processus dans le monde physique. En effet, la réponse de ces modèles aux entrées d'échelons

ou des impulsions peut offrir une bonne approximation de la réponse réelle de nombreux systèmes physiques existant dans le monde industriel. Par conséquent, le modèle de FOPDT est une simple approximation du comportement réel d'un système physique excité préalablement par des entrées aléatoires ou pseudo-aléatoires générées au voisinage des commandes désirées fournies par le contrôleur à synthétiser.

Pour identifier les paramètres du modèle mathématique de type FOPDT qui simule le comportement réel du processus, on a besoin des données expérimentales d'entrées et des données sorties. De ce fait, un modèle simple du premier ordre avec retard peut être écrit sous la forme suivante :

$$G(s) = \frac{A \cdot e^{-\tau \cdot s}}{1 + T \cdot s} \quad (2.3)$$

Avec A , T et τ représentent respectivement le gain statique, la constante du temps et le retard pur, s représente l'opérateur de Laplace. La Figure 2.4 représente le schéma de commande en boucle fermée d'un système physique ayant un modèle FOPDT.

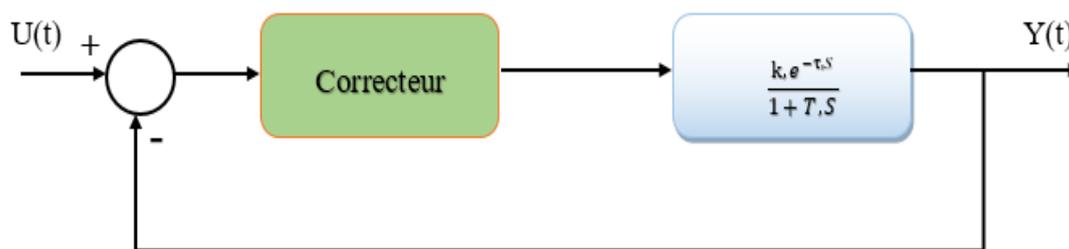


Figure 2. 4: Commande en boucle fermée basée sur un modèle du premier ordre à retard pur.

Les trois paramètres du modèle suscités peuvent être identifiés via des excitations appliquées sur le système réel. Dans ce cas, le retard de transport et de mesure, les temps d'analyse et le retard de calcul et de communication introduisent tous les retards purs dans les boucles de contrôle. Le retard est également utilisé pour compenser la réduction du modèle lorsque les systèmes d'ordre élevé sont modélisés par des modèles mathématiques d'ordre réduit et avec des retards purs importants.

2.3.2 Modèle de second ordre à retard pur

Un modèle du second ordre à retard pur est connu sous l'acronyme SOPDT (*Second Ordre Plus Dead Time*). Il est dérivé à partir des données utilisées pour la caractérisation d'un processus de régulation en vue de son contrôleur de type PID. Cette approche de modélisation

fournit des lignes directrices pour la conception du contrôleur et les relations de réglage sont proposées qui peuvent offrir une flexibilité dans le choix des réponses du système de contrôle et garantie de stabilité et de robustesse en présence des incertitudes de modélisation [5, 6]. La fonction de transfert d'un modèle SOPDT est définie comme suit :

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot s}}{(1+T_1 \cdot s)(1+T_2 \cdot s)} \quad (2.4)$$

Pour cette expérience, nous avons gardé en aval la position fixe de la vanne, puis appliquer le changement sur la vanne en amont. Le comportement dynamique peut être représenté par un modèle du second ordre avec un retard pur, qui peut être donné par [7] :

$$T_1 \cdot T_2 \frac{d^2 \Delta y_1(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d}{dt} \Delta y_1(t) = k \cdot \Delta u_1(t - \tau) \quad (2.5)$$

Où $\Delta y_1(t)$ représente la variation de niveau de l'eau en aval, $\Delta u_1(t)$ représente la variation de la vanne en amont, K représente le gain statique, T_1 et T_2 représentent les constantes du temps et τ représente le retard pur.

Nous considérons que T_1 est la constante de temps dominante (le plus grand associé à la dynamique de canal irrigation), T_2 est la plus petite constante de temps qui représente les grandeurs électriques des moteurs et la dynamique des portes, qui est beaucoup plus rapide que la piscine du canal [7]. Par conséquent, le modèle mathématique linéaire défini par l'équation (2.5) peut être représenté par la fonction de transfert suivante :

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\Delta y_1(t)}{\Delta u_1(t)} \\ &= \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot s}}{(1 + T_1 \cdot s)(1 + T_2 \cdot s)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.4 Identification paramétrique du modèle à retard pur

Identification des paramètres d'un modèle à retard peut être effectuée à partir de la connaissance expérimentale des entrées et sorties de manière à obtenir le même comportement du système physique. C'est l'étape de détermination des caractéristiques dynamiques du système d'irrigation à surface libre.

2.5 Présentation de la méthode d'identification

En général, il existe deux grandes classes de modèles qui sont : le modèle de connaissance et le modèle de comportement (expérimental). Ce classement est établi à propos des informations qui sont utilisées pour leurs constructions. A cet effet, la conception des modèles de connaissance est basée sur l'analyse des systèmes physiques, chimiques, biologiques, . . . , etc. En appliquant les lois théoriques de la mécanique, l'électromagnétisme, de la thermodynamique ...etc.

Toutefois, dans la pratique, on rencontre souvent des obstacles pour la construction des modèles de connaissance soit à cause de la complexité des processus, soit à cause des phénomènes qui sont mal connus. De plus, lors de la simplification des équations supplémentaires, on néglige souvent quelques paramètres physiques, cela permet d'obtenir des modèles moins précis, ce qui nous pousse à la conception des modèles incertains basés sur la mesure des d'entrées/sorties fournies par le système à modéliser, c'est ce qu'on appelle les modèles à comportement. Dans ce cas, la procédure de la conception des modèles à comportement consiste à poser une structure mathématique paramétrique qui représente une relation entre l'entrée et la sortie. Pour identifier les paramètres de l'équation, on utilise les mesures disponibles. On utilise alors des méthodes d'optimisation, afin d'estimer les paramètres du modèle choisi.

L'identification de la fonction de transfert demande une ressource de calcul, l'outil de logiciel va nous permettre d'automatiser cette tâche en proposant des modèles mathématiques pour le processus d'identification. Le logiciel Matlab utilise une multitude de fonctions intégrées et à plusieurs programmes outils testés et regroupés selon les domaines d'application dans des dossiers appelés boîtes à outils ou « *Toolbox* ». Parmi les domaines d'applications on trouve « *System Identification Toolbox* » qui permet de mener à bien les processus.

2.6 Extraction du modèle à retard pur via les Données expérimentales

Dans ce travail, les données expérimentales du système d'irrigation ont été enregistrées en utilisant un pas d'échantillonnage $T_s = 0.15$ secondes. Ces mesures réelles sont ensuite exploitées dans le logiciel Matlab pour élaborer le modèle de synthèse où les ouvertures de la vanne (données en %) représentent les grandeurs d'entrées tandis que les niveaux de l'eau sur la paroi du canal d'irrigation (données en cm) représentent les grandeurs de sortie. La Figure 2.5 représente les tracés de ces deux grandeurs dont celle donnée en rouge représente l'entrée et en bleue représente la sortie du système d'irrigation.

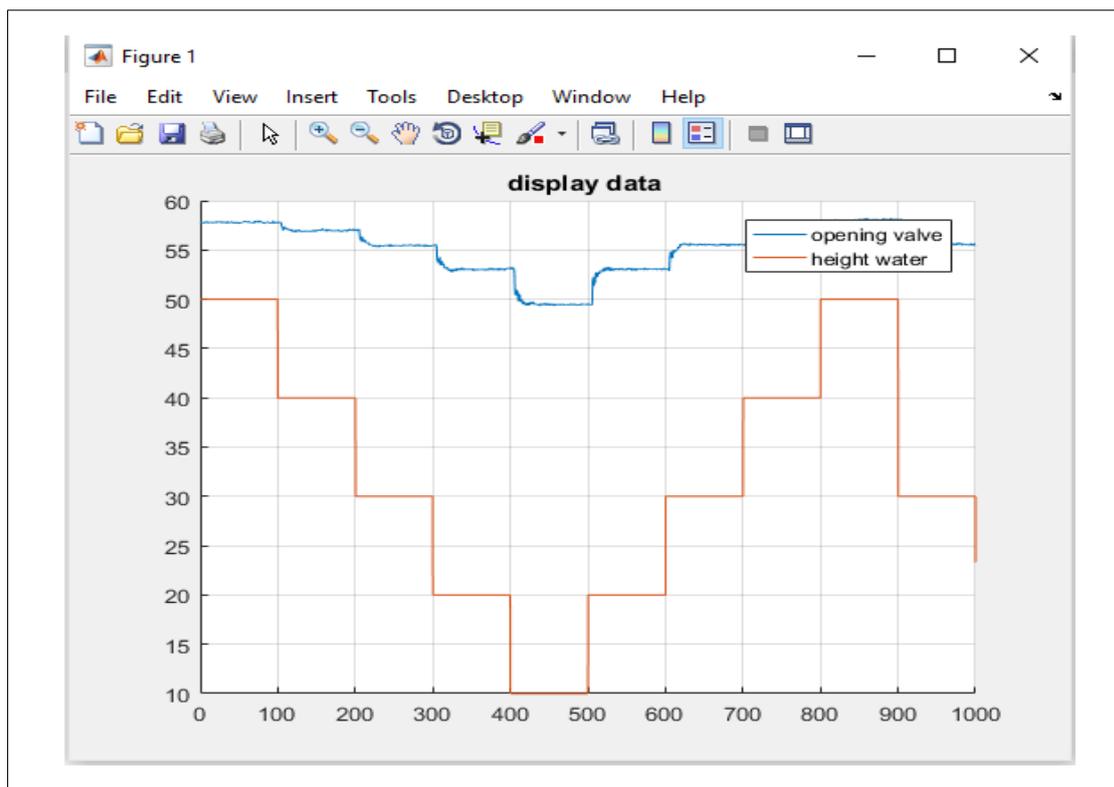


Figure 2. 5: Visualisation des mesures expérimentales d'entrée-sortie.

Il faut noter ici qu'il existe 4 fermetures et 5 ouvertures de la vanne qui assure l'alimentation en eau du canal. Parmi de celles-ci, on choisit les mesures d'entrée-sortie fournies par la quatrième fermeture comme étant le comportement à modéliser. La figure 2.6 représente le régime de fonctionnement à modéliser en conservant les deux modes couleurs pour le tracé des signaux d'entrée-sortie du système d'irrigation.

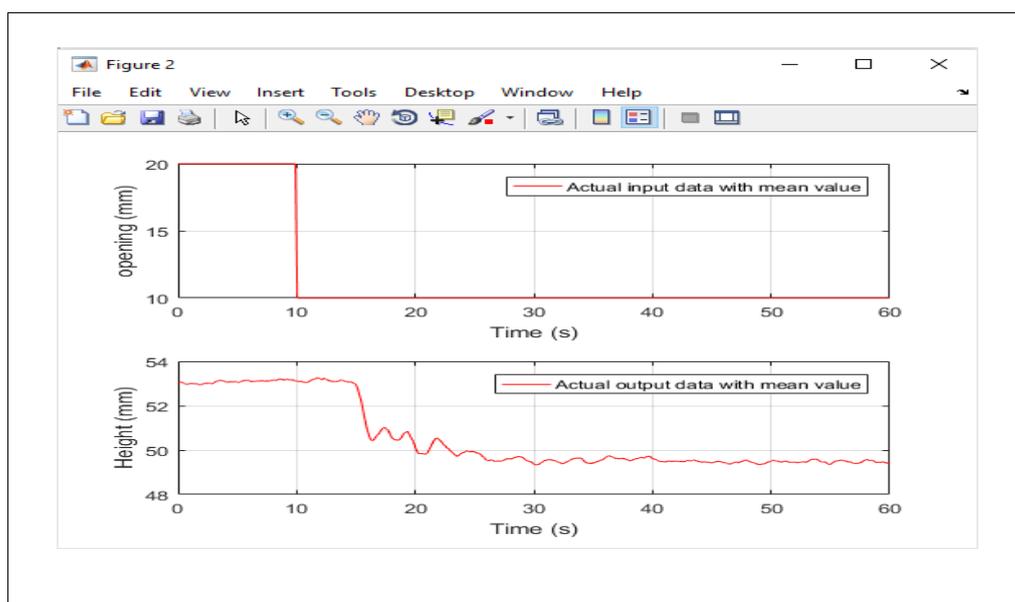


Figure 2. 6 : Visualisation de la quatrième fermeture pour l'identifier le modèle à retard pur.

Notant ici que la linéarisation demandée impose d'enlever la valeur moyenne à partir des deux signaux d'entrée-sortie de cette étape et le modèle des faibles signaux représente le transfert entre la nouvelle entrée δu et celle de sortie δy sachant que : $\delta u = u - u_0$ et $\delta y = y - y_0$, où u_0 et y_0 représentent la valeur moyenne enlevée à partir des signaux u et y respectivement. La figure 2.7 permet de visualiser les mesures d'entrée-sortie assurant le développement du modèle à faibles signaux.

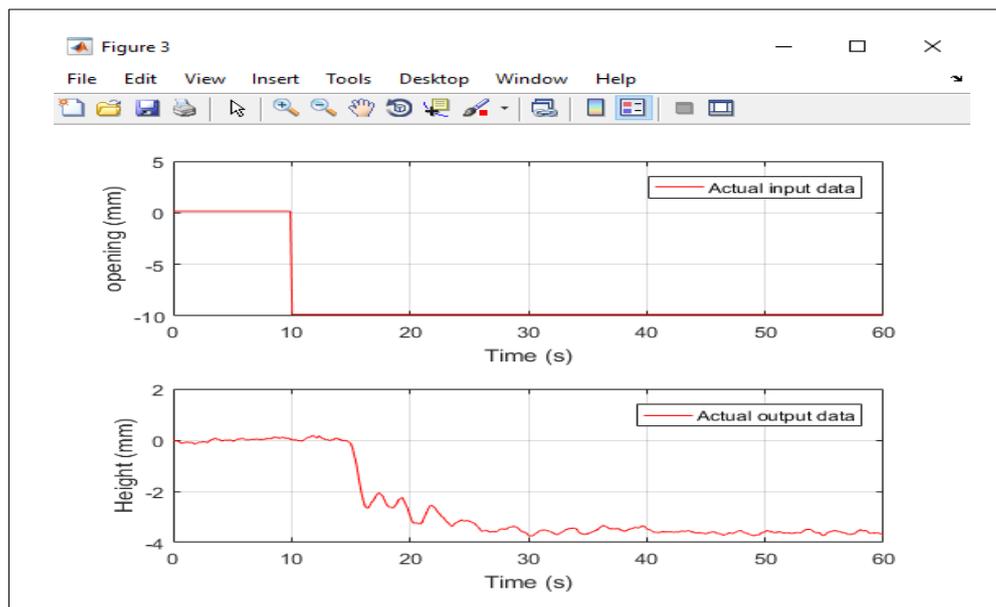


Figure 2. 7: Visualisation d'une étape de donnée utilisée pour l'identification.

2.7 Présentation de la bibliothèque « *System Identification* » du logiciel Matlab

Le logiciel Matlab est équipé de multiples boîtes à outils appelés « Toolbox », qui est une multitude de fonctions développées par des experts spécialistes dans le domaine de modélisation et identification des systèmes physiques. Pour lancer cet outil, on doit utiliser le scripte « **ident** » dans la fenêtre de commande du logiciel Matlab. La Figure 2.8 représente le résultat fourni par cette commande.

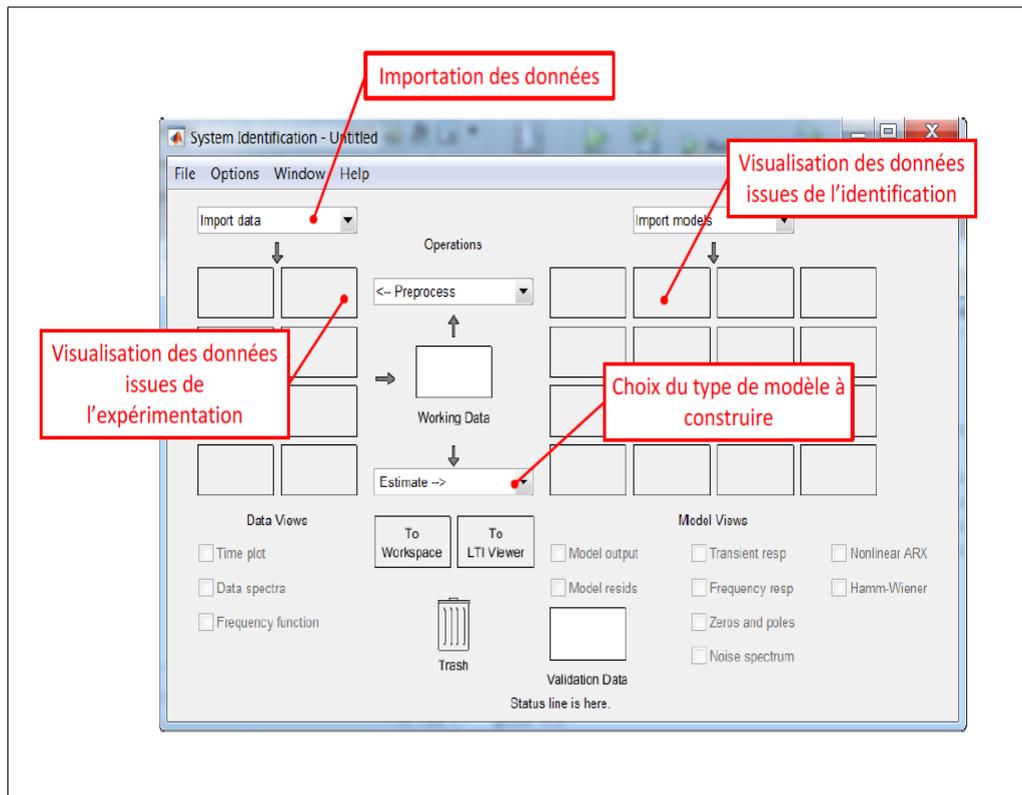


Figure 2. 8 : Description de la fenêtre de la bibliothèque « *system identification* ».

2.8 Importation des données expérimentales

Il est possible d'importer tous les types des données : temporelle, fréquentielle, Data Object. Dans notre travail, le type des données expérimentales est celui basé sur mesures enlevées dans le domaine temporel en utilisant le pas d'échantillonnage cité précédemment. Pour importer ces données, il faut choisir la commande « **import Data /Time domaine data** », de la fenêtre de « *system Identification* ». La Figure 2.9 permet d'illustrer cette étape lors du développement du modèle à retard pur.

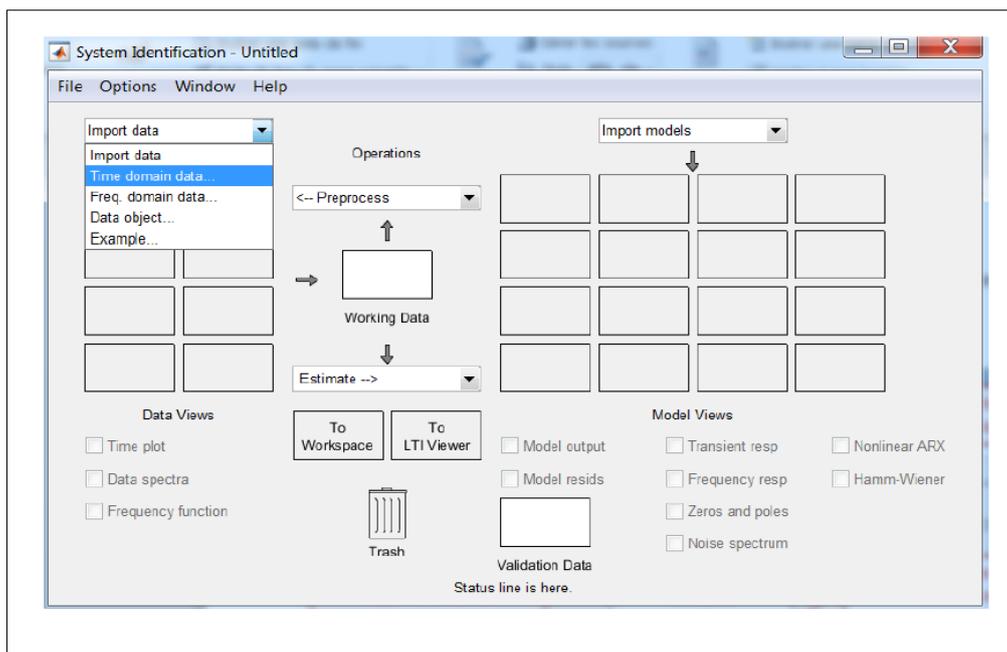


Figure 2. 9: Importation des données temporelle.

Cette commande permet d’ouvrir une fenêtre qui assure la définition des données nécessaires utilisées pour l’identification. Elle contient plusieurs sous fenêtres dont chacune est spécifiée pour une tâche bien précise. La Figure 2.10 représente toutes les sous-fenêtres ainsi que le rôle de chacune pour élaborer un modèle adéquat qui simule le comportement à modéliser du canal.

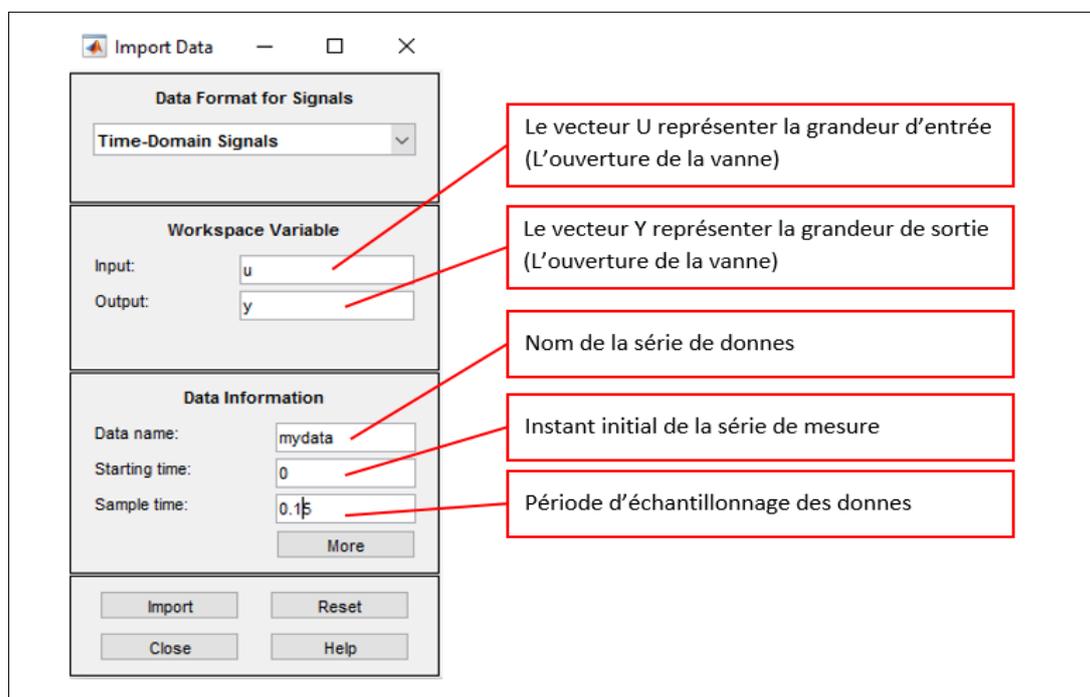


Figure 2. 10: Description de chaque sous-fenêtre pour importer les mesures réelles.

Les données expérimentales d'entrée-sortie sont ensuite importées dans la fenêtre de « *system Identification* » de la bibliothèque du Matlab et la figure 2.11 permet de visualiser cette étape. Ensuite, on choisit le bouton « Time plot » pour tracer les signaux d'entrée-sortie du modèle à faibles signaux comme le montre la figure 2.12.

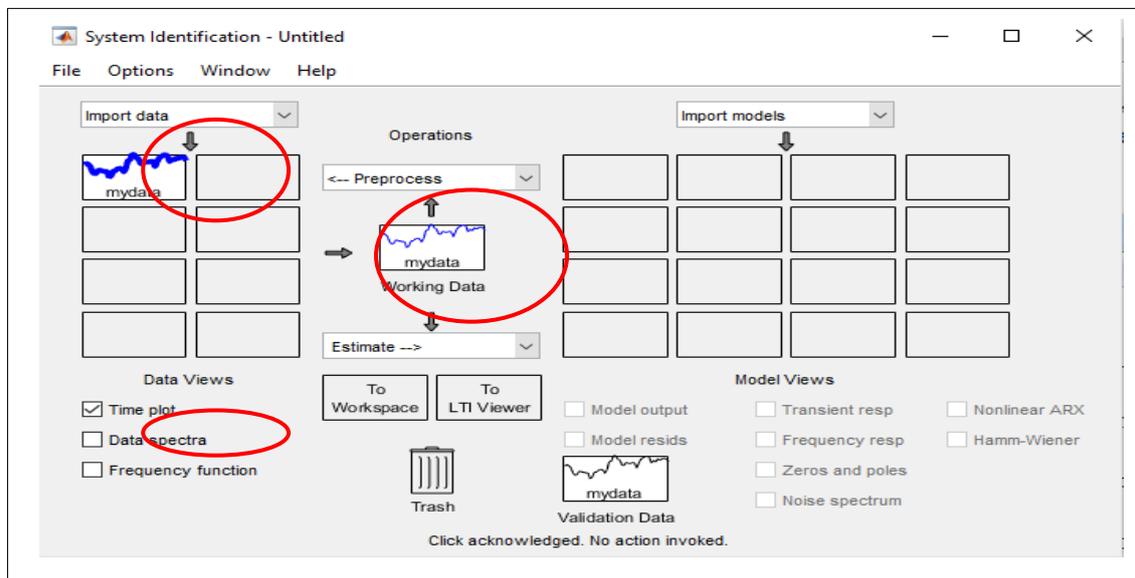


Figure 2. 11: Visualisation de l'étape d'importation des données d'entrée-sortie du modèle à faibles signaux.

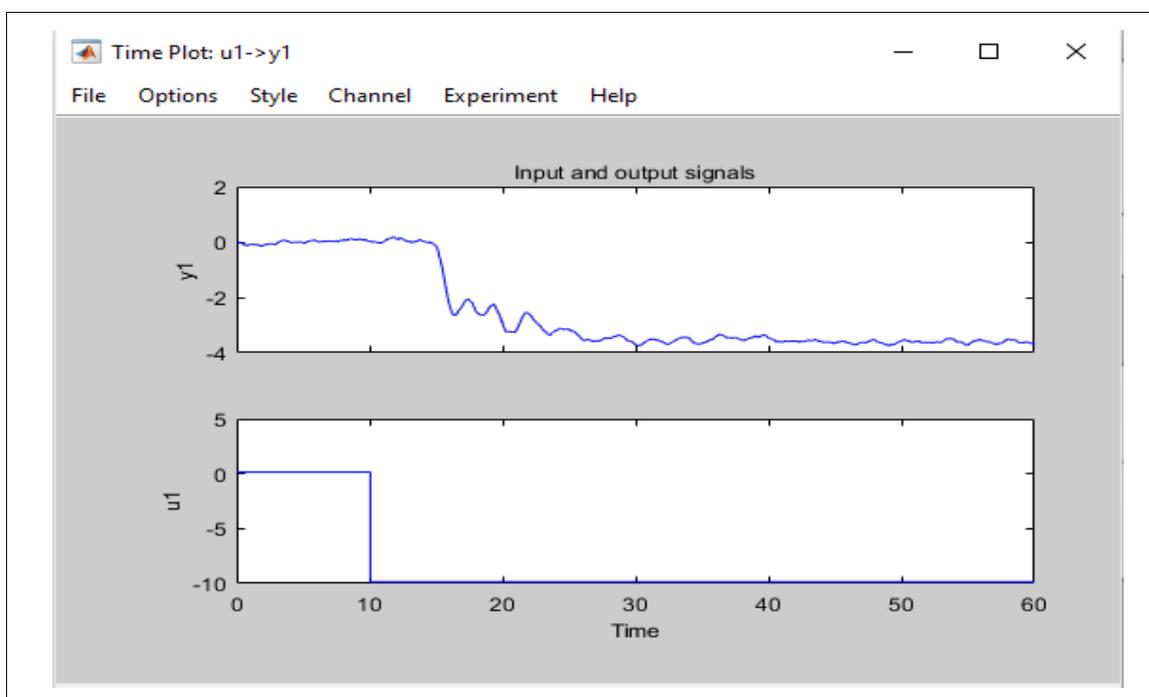


Figure 2. 12: Visualisation des données d'entrée-sortie du modèle à faibles signaux.

Maintenant, le choix de la structure du modèle souhaité est indispensable dans cette étape de modélisation. Dans ce cas, quatre structures sont disponibles dans l'interface de « *System identification Toolbox* » à savoir: fonction de transfert, modèle de processus, représentation d'état, modèle non linéaire). Dans ce travail, nous avons choisi le modèle de type « **Process model** ». Cette étape est illustrée par la Figure 2.13 comme suit :

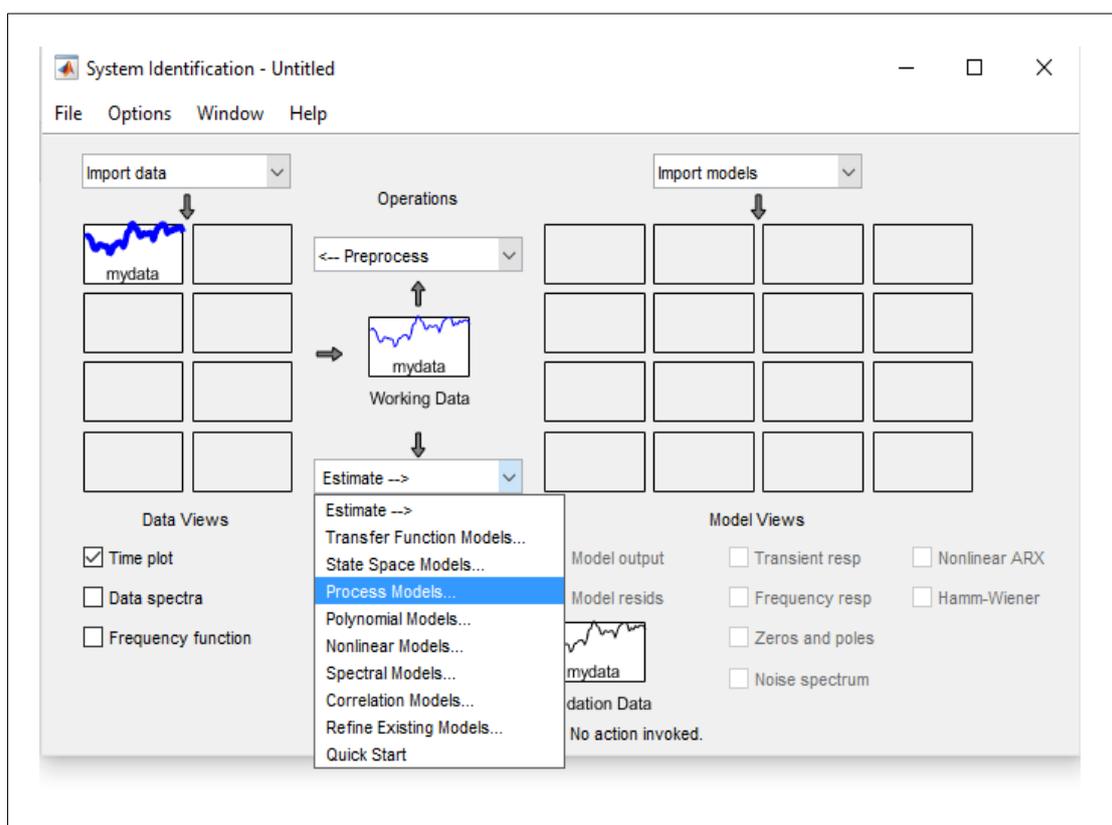


Figure 2. 13: Choix de la structure du modèle de synthèse.

Après le choix du modèle, la fenêtre « **Process Models** » s'ouvre et donne le lieu de choisir la forme de la fonction de transfert souhaitée. Dans ce travail, nous avons choisi la structure basée sur la fonction de transfert du premier ordre donnée avec retard pur. La figure 2.14 montre clairement tous les contenus de cette sous-fenêtre.

Dans ce travail, les trois paramètres du souhaité sont initialisés systématiquement et la recherche sur le gain statique est assurée sur l'intervalle $]-\infty, +\infty[$, cependant la recherche sur la constante du temps et le retard pur est effectuée sur les intervalles $[0, +\infty[$ et $[0, 4.5]$.

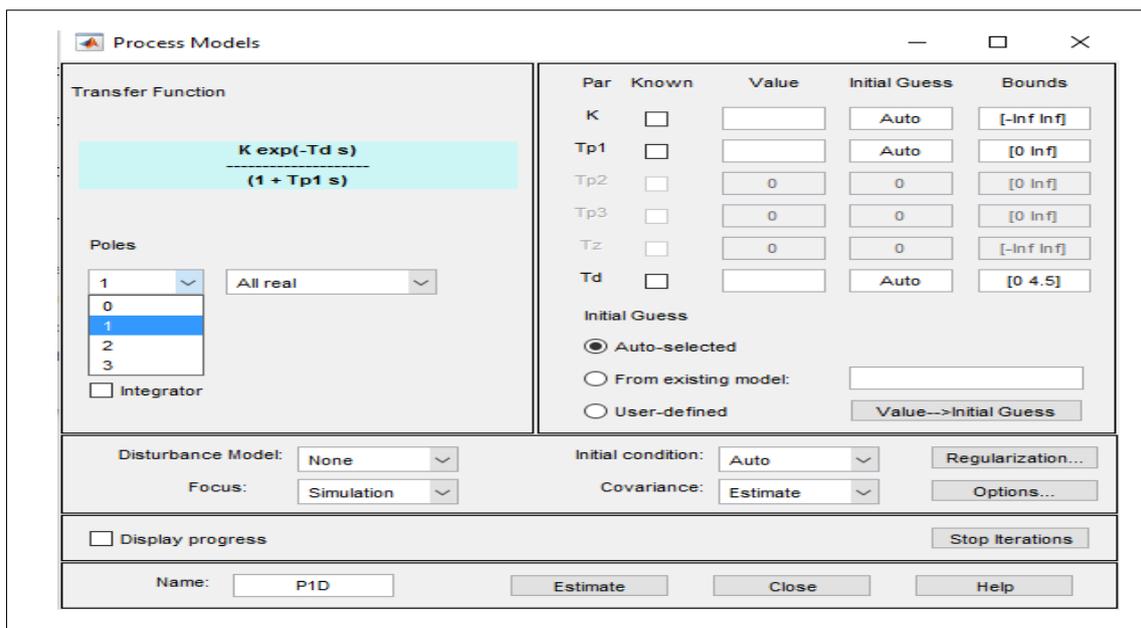


Figure 2. 14: Choix de la forme de la fonction de transfert.

Ensuite, on appuie sur le bouton « **Estimate** » pour identifier les paramètres du modèle souhaité. Le résultat de cette estimation est ensuite affiché dans la fenêtre « **Plant Identification Progress** » ce qui donne la possibilité de visualiser le taux de réussite de cette étape de modélisation et l'identification paramétrique du modèle souhaité (voir la Figure 2.15).

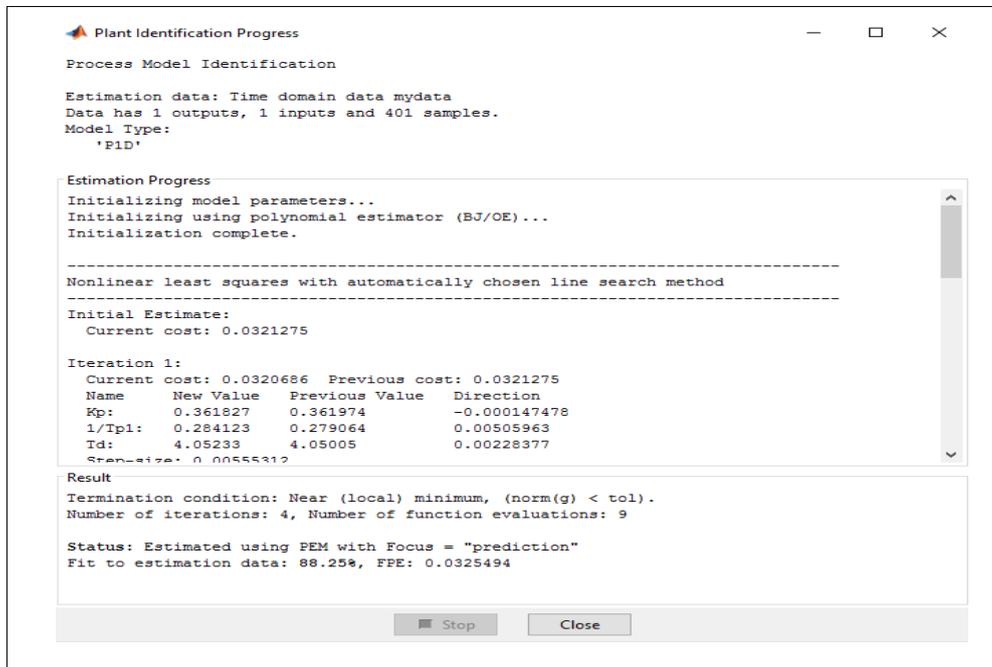


Figure 2. 15: Résultat de l'étape d'estimation des paramètres du modèle souhaité.

Dans ce travail, l'interface graphique du Matlab fourni, à la quatrième itération, un taux de réussite égal à 88.25% et un écart de modélisation égal à 0.0325494. De plus, Toutes les informations sur le modèle souhaité sont disponibles dans l'acronyme « **PID** ». Ce nom est

affecté systématiquement par le logiciel du Matlab. Lorsque on appui sur cette abréviation, on aura la structure du modèle souhaité ainsi que les trois paramètres correspondants, qui sont fournis après l'étape d'estimation (voir la Figure 2.17)

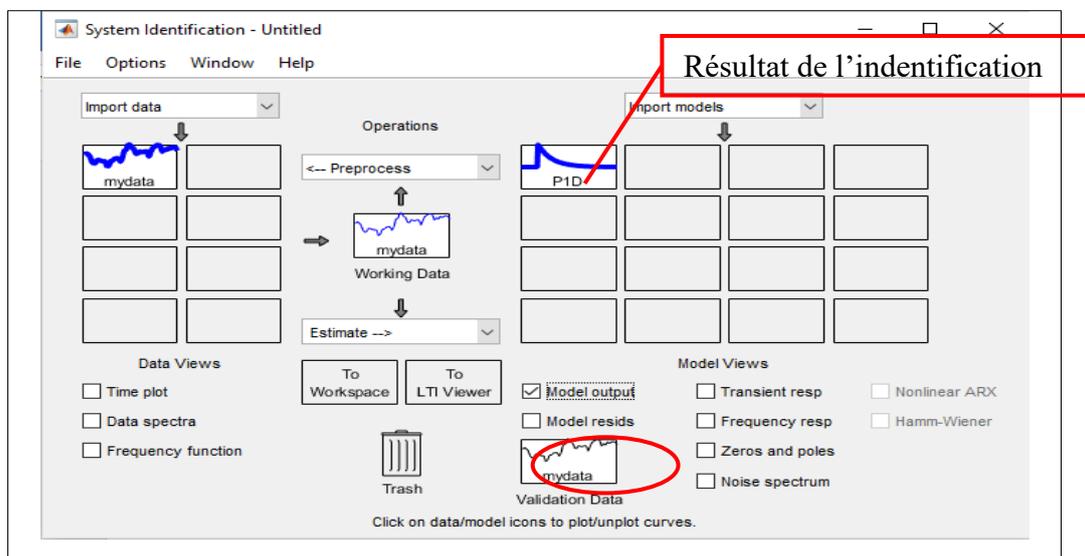


Figure 2. 16: Visualisation de résultats de l'identification.

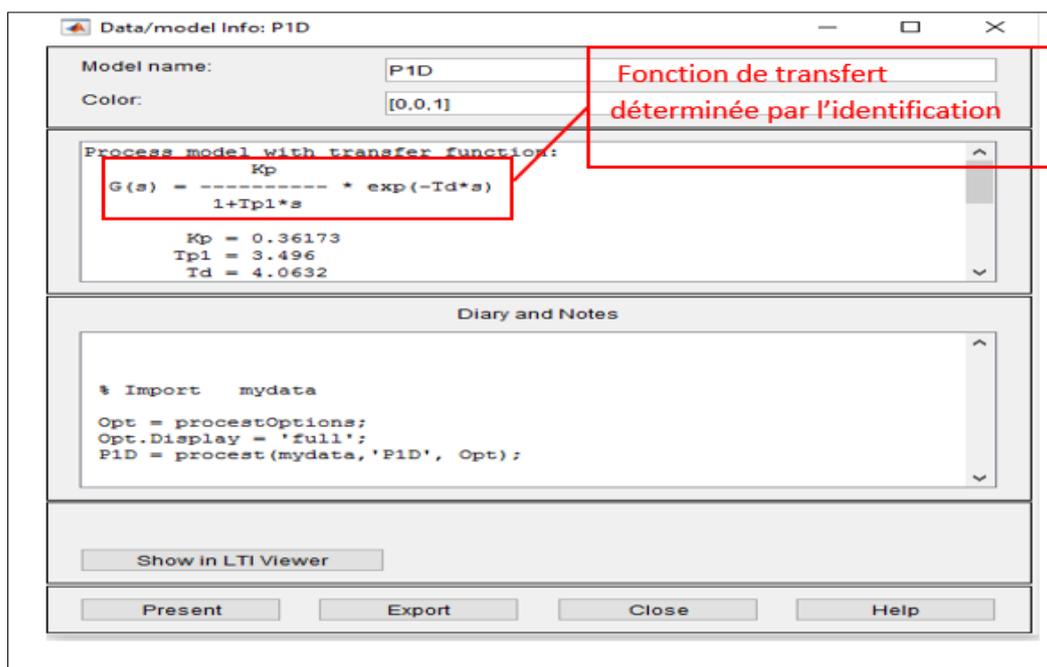


Figure 2. 17: Fonction de transfert obtenue par l'identification.

Dans ce travail, l'étape d'estimation est achevée par l'obtention des trois paramètres suivants : gain statique $K = 0.36173$, constante du temps $\tau = 3.496$ et retard pur $\theta = 4.0632$. Maintenant, si on appui sur la case « **Model Output** », on pourra facilement comparer la sortie prédite par le modèle souhaité et la sortie réelle fournie par les données expérimentales fournies par le système d'irrigation (Voir la Figure 2.18).

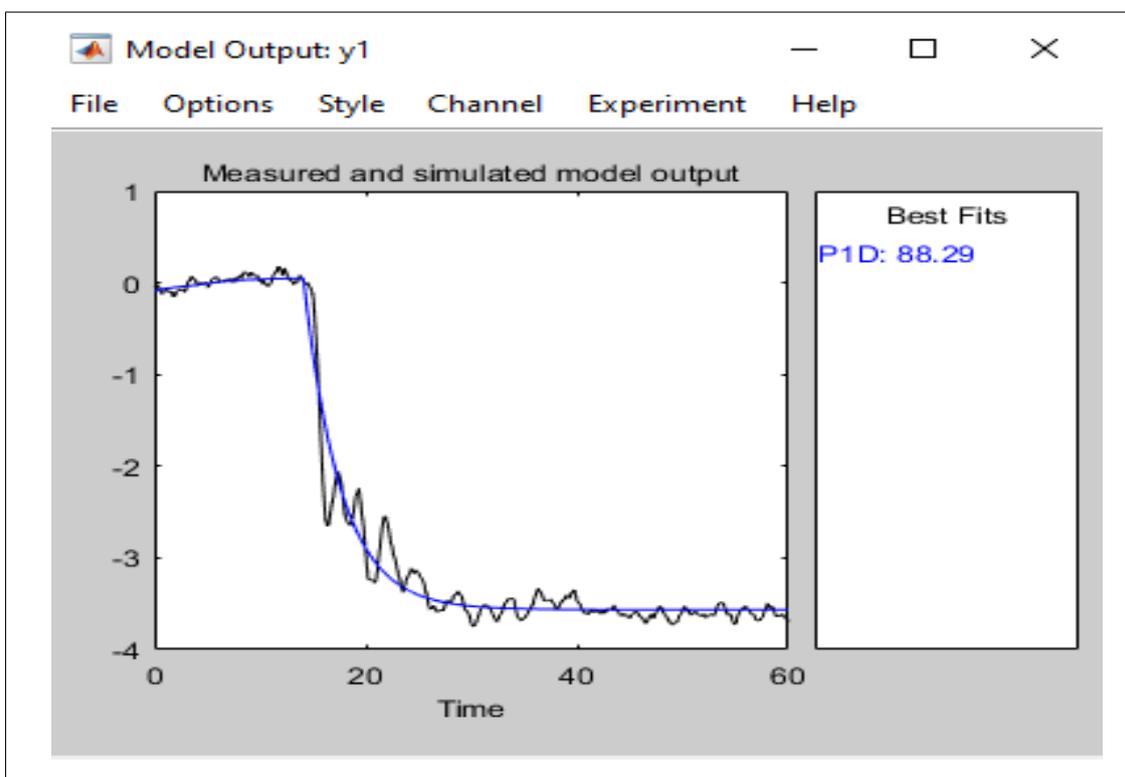


Figure 2. 18: Comparaison entre la sortie réelle et la sortie prédite par le modèle souhaité.

L'implémentation du modèle précédent dans l'interface graphique de Simulink du Matlab est assurée par les schémas blocs fournis par la Figure 2.19. D'où, l'approximation du bloc comportant le retard pur du modèle souhaité est assurée par la méthode de Padé, ce qui fournit la fonction de transfert suivant :

$$e^{-4.0632*s} = \frac{-s^3 + 2.953 * s^2 - 3.634 * s + 1.789}{s^3 + 2.953 * s^2 + 2.953 * s^2 + 3.634 * s + 1.789} \quad (2.7)$$

Ici, l'ordre du transfert approximant le retard pur est préalablement fixé par l'utilisateur à 3 et le modèle global est donc approximé par le transfert suivant :

$$G(s) = \frac{0.36173(-s^3 + 2.953 * s^2 - 3.634 * s + 1.789)}{(s^3 + 2.953 * s^2 + 2.953 * s^2 + 3.634 * s + 1.789)(1 + 3.496 * s)} \quad (2.8)$$

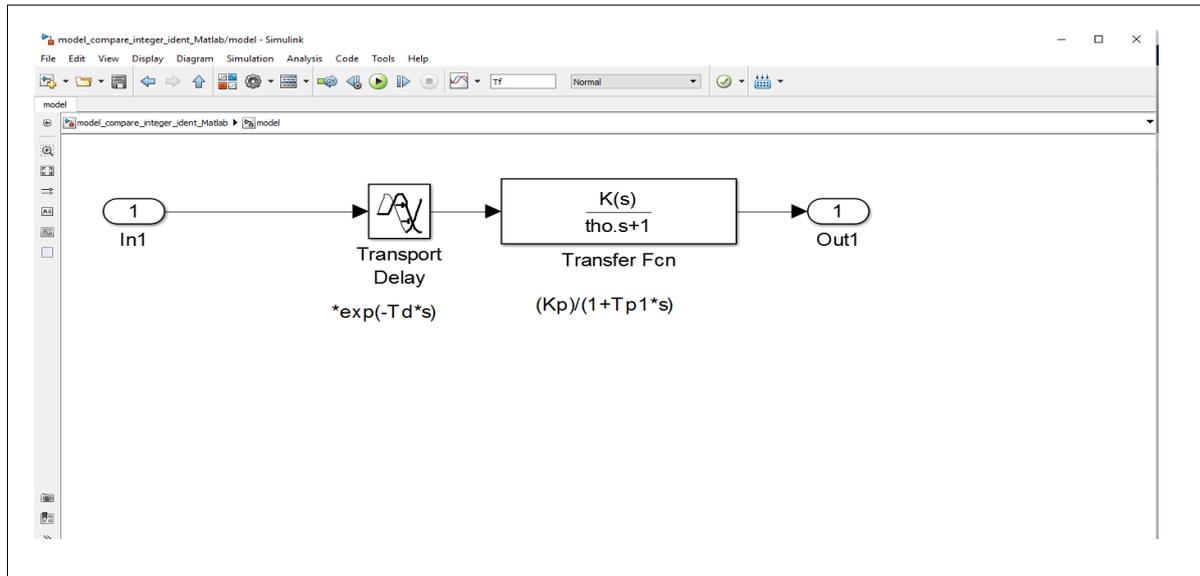


Figure 2.19 : Simulation d'un modèle d'identification.

La figure (2.20) représente l'implémentation via le Simulink du Matlab du modèle global et le système réel, qui présenté par ses mesures d'entrée-sortie réelles.

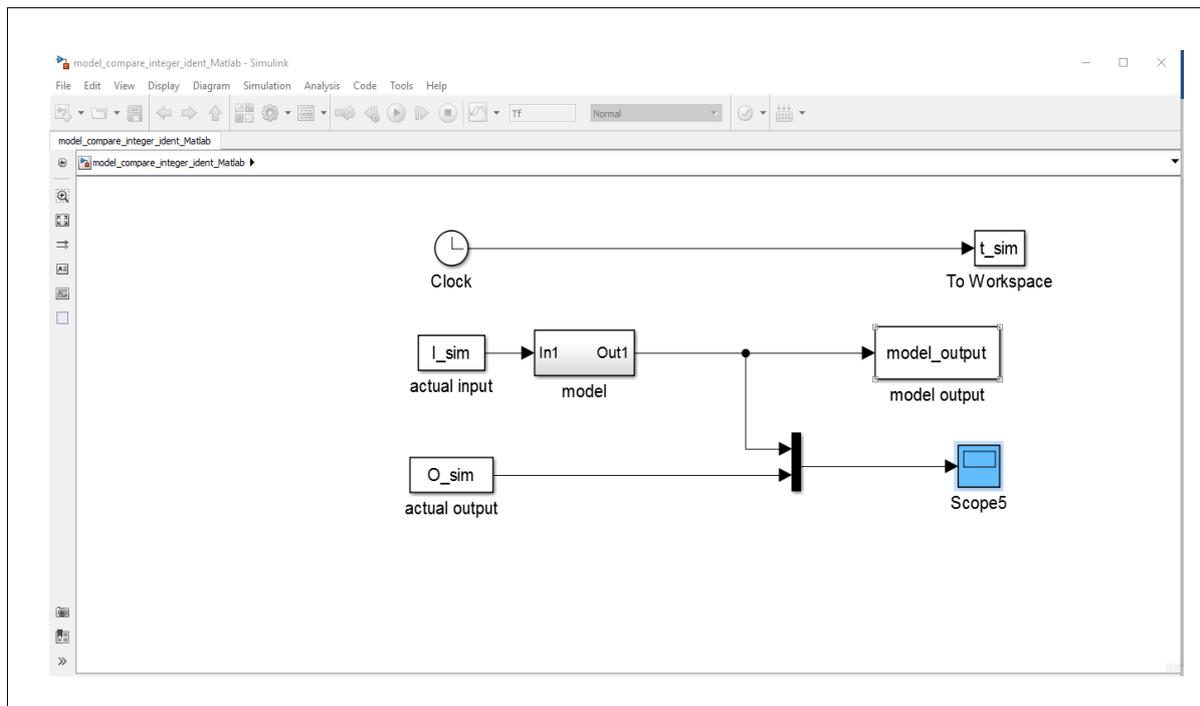


Figure 2.20 : Implémentation du modèle global et comparaison avec les mesures réelles.

L'implémentation suscitée permet de valider le modèle global et ce à partir de l'appuyer sur le bloc « **scope** ». D'où, la comparaison des deux sorties réelle et prédite est illustrée dans la Figure 2.21.

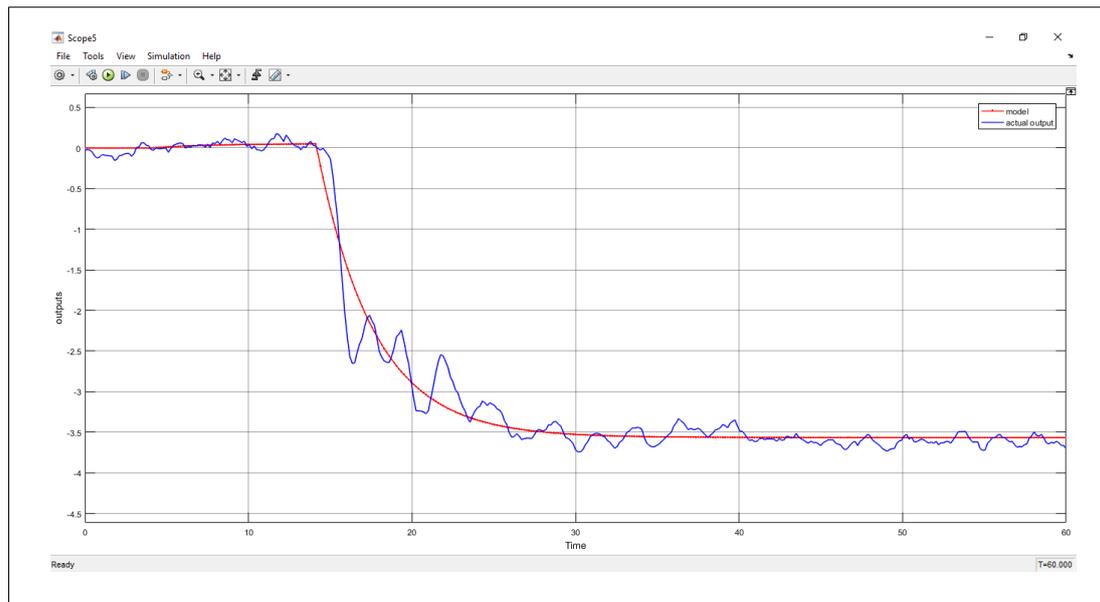
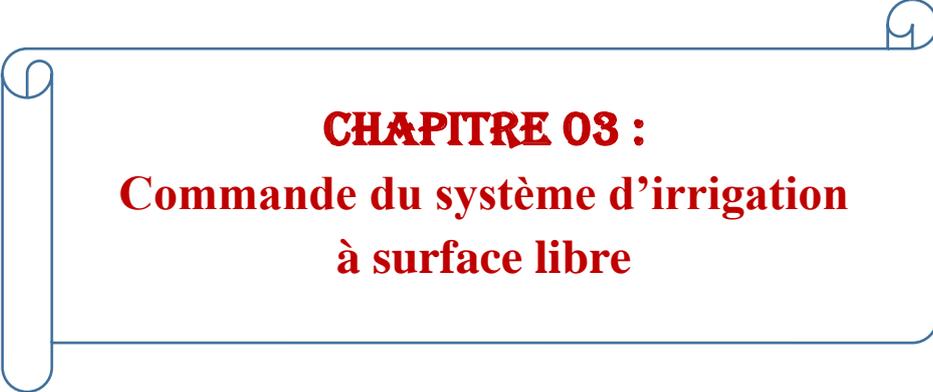


Figure 2.21 : Comparaison des deux sorties réelle et prédite.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes étapes nécessaires pour développer le modèle de synthèse souhaité. L'étape d'estimation des paramètres de ce modèle s'est basée sur les mesures réelles fournies par le système d'irrigation. Ce chapitre a consacré également à l'implémentation de la structure du modèle dans laquelle son retard pur est approximé par la méthode de Padé. Finalement, nous avons obtenu un modèle mathématique global qui représente le transfert entre l'ouverture de la vanne installée en amont du barrage et la hauteur de l'eau en aval à long dans canal d'irrigation. Ce modèle sera utilisé pour effectuer des prédictions de la sortie du processus, ou pour la conception de contrôleur, ou encore pour simuler le système de commande. De plus, l'approximation du modèle à retard conduit à fournir un modèle final d'ordre élevé et la phase de synthèse du contrôleur stabilisant le système d'irrigation sera détaillée dans le chapitre suivant.



CHAPITRE 03 :
**Commande du système d'irrigation
à surface libre**

3.1 Introduction

Le terme « commande des canaux » décrit les étapes nécessaires pour assurer le niveau d'eau et l'écoulement requis le long d'un canal. Le contrôle du canal est réalisé par la manipulation de variables (ouverture de la porte, débits de la pompe) afin d'obtenir les conditions souhaitées dans le canal. Ces conditions sont contrôlées par le volume d'eau pompé dans l'entrée et la sortie du canal, et par la modification des positions des portes et la régulation des débits d'eau à travers les branchements de livraison d'eau.

Lorsqu'un canal ayant un débit constant, cela peut faciliter la phase de contrôle et la synthèse du contrôleur stabilisant la boucle de commande devient très facile. Par contre, l'existence des problèmes causés par les changements de débit aux points de consigne, les livraisons suivant la demande d'eau, qui est toujours n'est pas constante dans l'espace et dans le temps, ..., etc., peuvent conduire à une variation de façon imprévisible de l'état du canal nécessitant par conséquent d'une synthèse des contrôleurs adéquats par des méthodes de commande très puissantes.

En général, la commande du système d'irrigation à surface libre est souvent basée sur le modèle de synthèse comme celui présenté dans le chapitre précédent. Ce modèle doit simuler le plus précis que possible le comportement réel du canal autour d'un point de fonctionnement choisi préalablement par l'utilisateur. La synthèse du contrôleur souhaité dépend donc sur l'ordre et la structure du modèle de synthèse. A cet effet, ce chapitre portera les étapes nécessaires pour concevoir un contrôleur stabilisant le niveau d'eau du canal en utilisant une méthode de synthèse qui est disponible dans la bibliothèque Matlab/Control/Toolbox. Les tests et l'analyse de robustesse du système bouclé ont été réalisés dans le laboratoire scientifique de la mécanique des fluides qui se situe au sein de l'Université de Castilla-La Mancha (UCLM)-Espagne.

Dans ce chapitre, nous allons concevoir un correcteur robuste de tel sorte que le réglage de ses paramètres sera assuré à partir du modèle d'ordre élevé développé en chapitre 2. Ce contrôleur doit assurer la stabilité en boucle fermée et en présence des incertitudes de modélisation causée par l'approximation du retard pur et d'autres perturbations extérieures. Les performances de ce contrôleur seront comparées par celles fournies par un contrôleur conventionnel qui prend la structure de PI.

3.2 Présentation de prototype

L'objectif de cette expérience est de passer en revue, les principales méthodologies utilisées dans le développement de modèles et dans la conception de contrôleur pour des systèmes d'irrigation à surface libre. Ces derniers sont souvent caractérisés par des temps de retard, du comportement non linéaire, des perturbations inconnues et des interactions entre ses grandeurs d'entrée-sortie [8]. Sachant qu'une grande partie de ces travaux représente une porte ouverte pour d'autres futurs candidats intéressés par cet axe de recherche. Nous allons donc présenter une synthèse du contrôleur basée sur un outil modeste disponible dans la bibliothèque du Matlab. Des contrôleurs modernes abstraits sont basés sur l'utilisation des modèles mathématique. En conséquent, il est avantageux d'analyser le problème résultant de l'incertitude entachant le modèle de synthèse lors du contrôle des canaux d'irrigation. Ce problème a été souvent ignoré dans les études théoriques et dans la régulation de processus pratique. Alors nous présenterons une expérience sur un canal qui illustre l'implémentation du contrôleur afin de stabiliser la boucle de commande du canal d'irrigation.

Le prototype simulant le fonctionnement du système d'irrigation est un canal en verre sous forme rectangulaire qui se situe dans le laboratoire scientifique de mécanique des fluides de l'Université de Castilla-La Mancha (UCLM)- Espagne, où la longueur du canal est de 5 mètres, la largeur est de 0,08 mètre et la hauteur est de 0,25 mètre. Le canal est équipé d'une plateforme utile qui constituée des capteurs de niveau ultrasons (ULS), un capteur de position de porte (GPS), un moteur à courant continu, un capteur de débit (FS), des pompes électriques, un système de contrôle programmable et une station de contrôle informatisée. La Figure 3.1 représente le prototype sur lequel on a implémenté notre contrôleur stabilisant le niveau du canal.

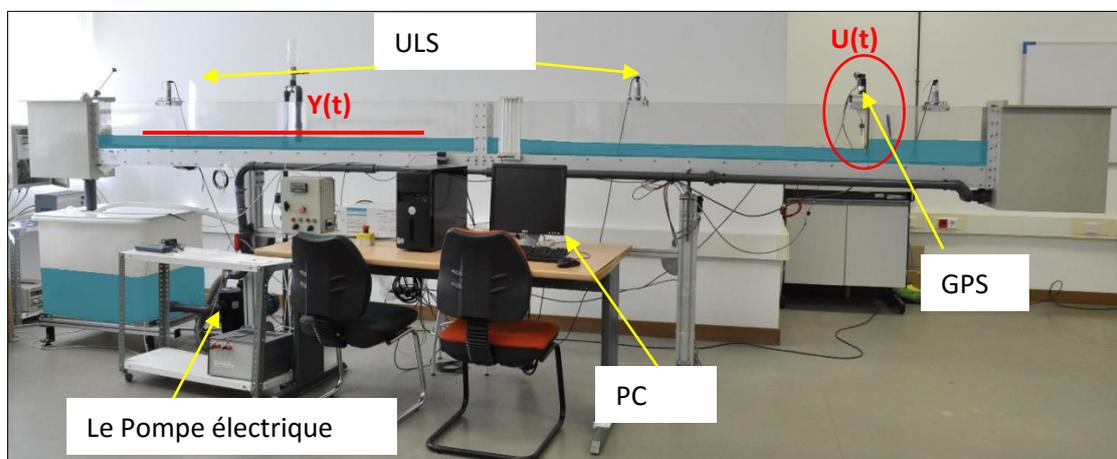


Figure 3. 1: Prototype du canal d'irrigation.

Le canal utilise un PC comme une station de contrôle et une application appelée SCADA (*System Control And Data Acquisition*) est installée sur ce PC pour assurer le contrôle et la supervision automatiques du canal. L'application SCADA permet d'assurer la mise en œuvre de différentes stratégies de contrôle, ainsi que différentes méthodes de fonctionnement du canal (en amont, en aval, mixte, etc.). Elle assure également le changement des points de consigne des deux boucles de contrôle à savoir : primaire et secondaire [8].

Les capteurs de niveaux sont de type ultrason qui délivrent après traitement une tension de 0 Volt à 10Volts correspondant à tirant d'eau de 0 cm à 25cm. Les vannes sont actionnées par un moteur à courant continu asservis qui s'ouvrent la vanne de manière linéaire de 0 cm à 25 cm en fonction de leur tension d'entrée (0 à 10V). Un PC de supervision récupère toutes les données issues des capteurs et gère tous les actionneurs via une interface appelé dSPACE (LABVIEW).

Le prototype du canal est donné dans la Figure 3.1, où la grandeur régulant $u(t)$ est la position ascendante de la porte, et la grandeur à régler $y(t)$ est le niveau d'eau en aval d'extrémité. Afin d'éviter tout gaspillage d'eau, l'eau s'écoule à l'intérieur du canal en circuit fermé. De plus, la présentation schématique de ce prototype est illustrée dans la figure 3.2.

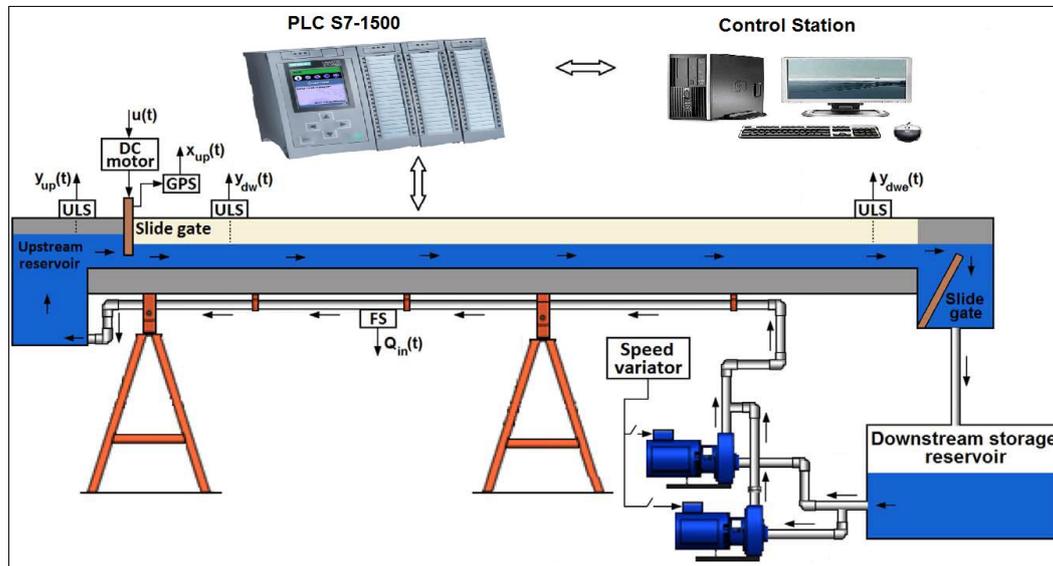


Figure 3.2 : schéma de commande du canal d'irrigation.

Selon la Figure 3.2, le canal a été divisé en deux bassins : le premier bassin est caractérisé par ses petites dimensions, nommé ici « *upstream pool* », agissant dans ce cas comme réservoir amont ; le deuxième bassin appelé « *downstream pool* » ayant une dimension plus importante par rapport à celle du premier bassin, et elle joue le rôle du bassin principal à automatiser [8].

Les pompes électriques ont pour rôle de pompage de l'eau du réservoir de stockage en aval vers le réservoir en amont. De plus, la commande de ce canal hydraulique présente certains inconvénients car du fait de la petite taille du bassin amont, les opérations d'ouverture et de fermeture de la porte amont produisent des différences importantes de niveau d'eau à l'aval. Pour résoudre ce problème, une boucle de commande est introduite afin d'assurer le réglage de niveau d'eau en amont et de garder le niveau de l'eau à une référence fixe en aval. Le niveau d'eau en amont est contrôlé par un régulateur PID, qui agit sur la variation de vitesse de pompe.

Après l'obtention de modèle de synthèse de ce canal, nous allons effectuer une conception d'un contrôleur assurant la stabilisation de niveau d'eau dans le système d'irrigation. La synthèse de ce contrôleur est assurée au moyen du logiciel du Matlab en utilisant la fonction « **PidTool** ».

3.3 Synthèse du contrôleur via le modèle du canal

L'objectif principal de la synthèse du contrôleur est d'assurer une réponse rapide caractérisée par une erreur de poursuite très réduite et d'assurer une marge élevée de stabilité en boucle fermée en présence des incertitudes de modélisation et d'autres effets indésirables causés par les bruits de mesures et des grandeurs d'influences causées par l'environnement extérieur. La Figure 3.3 représente le système bouclé du canal basé sur le modèle mathématique développé par la méthode des faibles signaux.

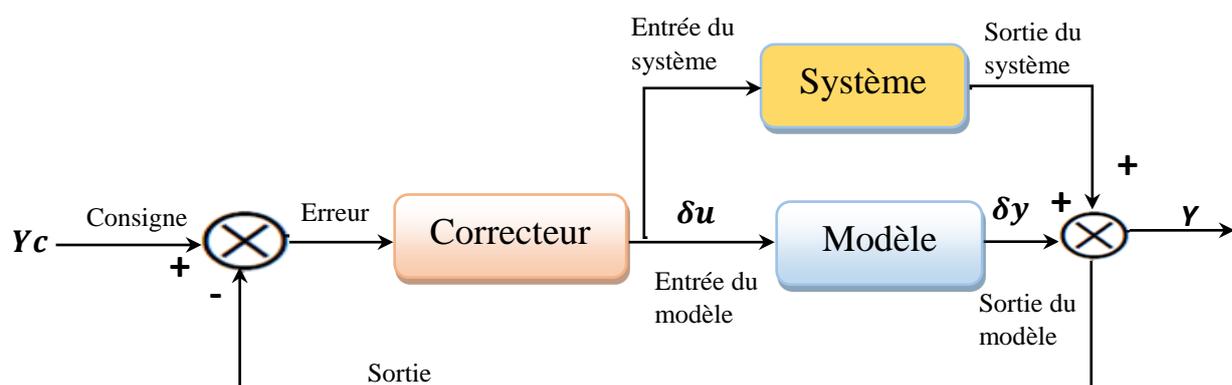


Figure 3.3 : Système boucle du canal d'irrigation.

La commande **PidTool** du Matlab permet de concevoir le contrôleur souhaité à travers un modèle fixé préalablement par l'utilisateur. Après l'ouverture de la fenêtre de commande du Matlab, on peut choisir la structure des contrôleurs tels que la structure P, PI et PID. Cette commande du Matlab permet également de choisir la forme série ou parallèle du contrôleur PID.

Tout d'abord, on essaye de synthétiser un contrôleur de type PI. La commande PidTool permet de régler les paramètres de ce contrôleur à travers du temps de stabilisation de la réponse indicielle ainsi que le degré de robustesse en face tous les signaux de perturbations. Dans ce travail et pour raison d'implémentation du contrôleur, on a choisi un temps de stabilisation égal à 19.99 secondes et un degré de robustesse égal à 65%. La Figure 3.4 permet de visualiser l'allure de la réponse indicielle souhaitée. Cette dernière comporte un temps de retard égal presque à 5 secondes, un dépassement presque nul et une erreur de poursuite très réduite et ce à partir du temps de stabilisation cité précédemment.

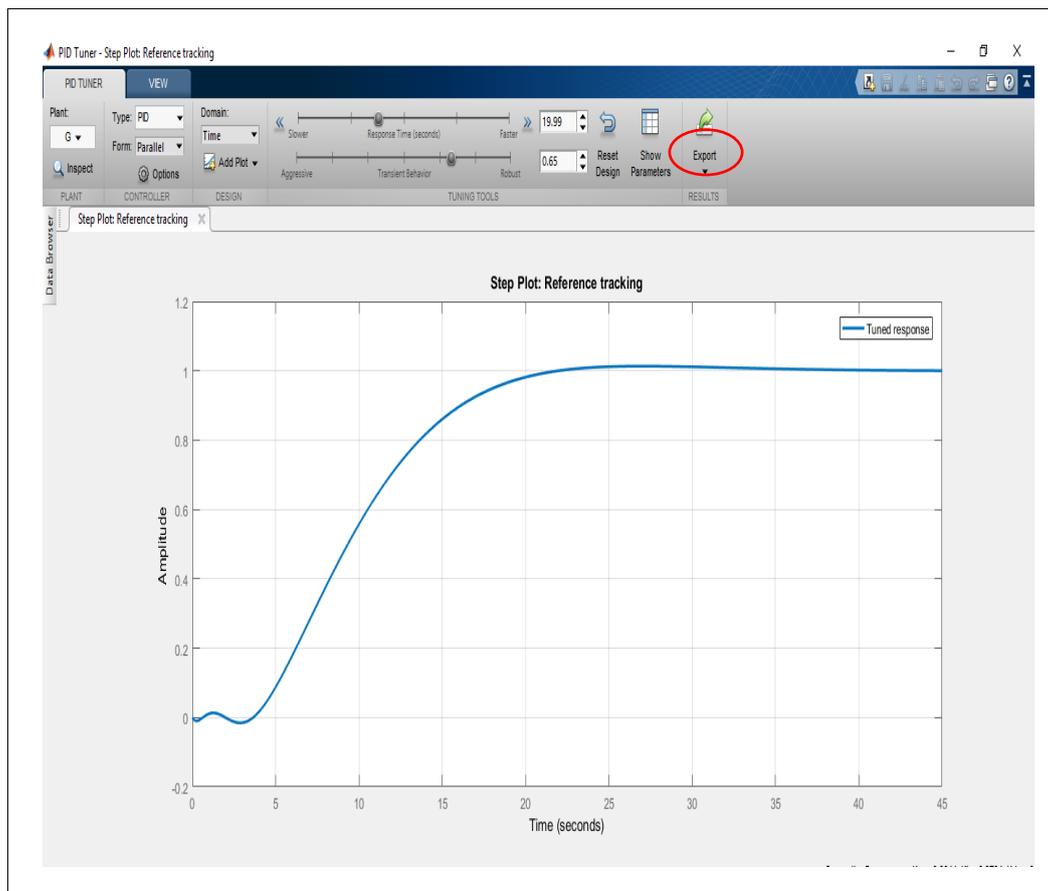


Figure 3.4 : Réponse indicielle du système bouclé par un contrôleur PI.

Pour visualiser les deux paramètres de ce contrôleur, il suffit d'appuyer sur le bouton **Export** survenant dans la fenêtre présentée dans la Figure 3.4. Par conséquent, l'optimisation fournie par la commande *PidTool* fournit alors les deux paramètres du contrôleur PI avec : $K_p = 0.179$ et $K_i = 0.134$.

L'implémentation de ce contrôleur exige de récupérer la valeur moyenne u_{moy} enlevée précédemment à partir des mesures d'entrées lors de la phase d'identification et la commande réelle qu'on doit l'envoyer au système physique sera égale à $u(t) = u_{moy} + \delta u(t)$ avec $\delta u(t)$

représente la commande fournie par le contrôleur PI. De plus, pour comparer le niveau prédit par le modèle avec celui fourni par le système réel, il faut rajouter préalablement la valeur moyenne y_{moy} enlevée précédemment à partir des mesures de sortie lors de la phase d'identification. La sortie prédite sera alors égale à $y(t) = y_{moy} + \delta y(t)$ où $\delta y(t)$ représente la sortie fournie par le modèle à faible gain. La Figure 3.5 représente comment envoyer la commande réelle au canal d'irrigation et comment comparer la sortie prédite avec l'entrée de consigne.

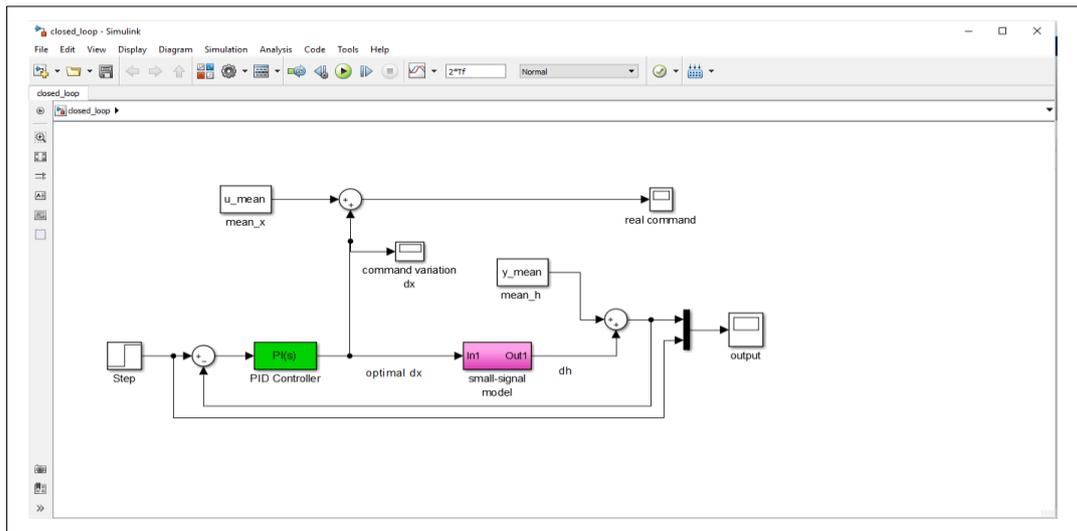


Figure 3.5 : Simulation d'un système en boucle fermée.

Pour visualiser la dynamique de poursuite de l'entrée de référence, on doit tout d'abord fixer la consigne. Cela est assuré par le bloc « **step** » présenté dans la Figure 3.5. Le choix de la consigne est effectué suivant la Figure 3.6 suivante :

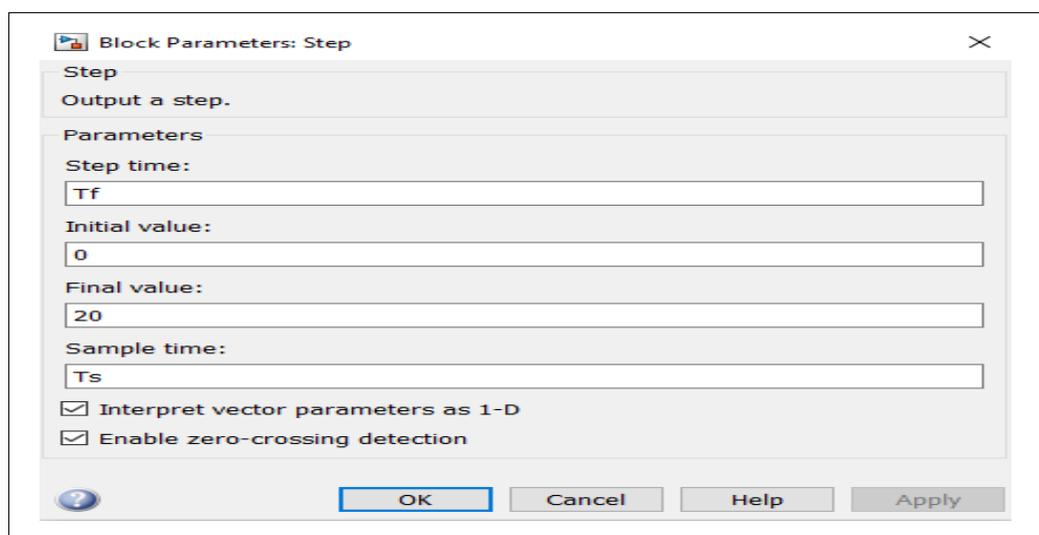


Figure 3.6 : Choix de l'entrée de consigne pour visualiser la dynamique de poursuite.

Dans ce travail, nous avons choisi le niveau zéro de l'eau au long du premières 60 secondes puis un niveau de 20 cm pendant les 60 secondes restantes. Dans ce cas, le canal ayant un niveau initial plus de 50 cm et le contrôleur PI doit appliquer une fermeture de la vanne d'alimentation afin d'atténuer le niveau jusqu'à 0 cm, puis une ouverture assurant le niveau souhaité

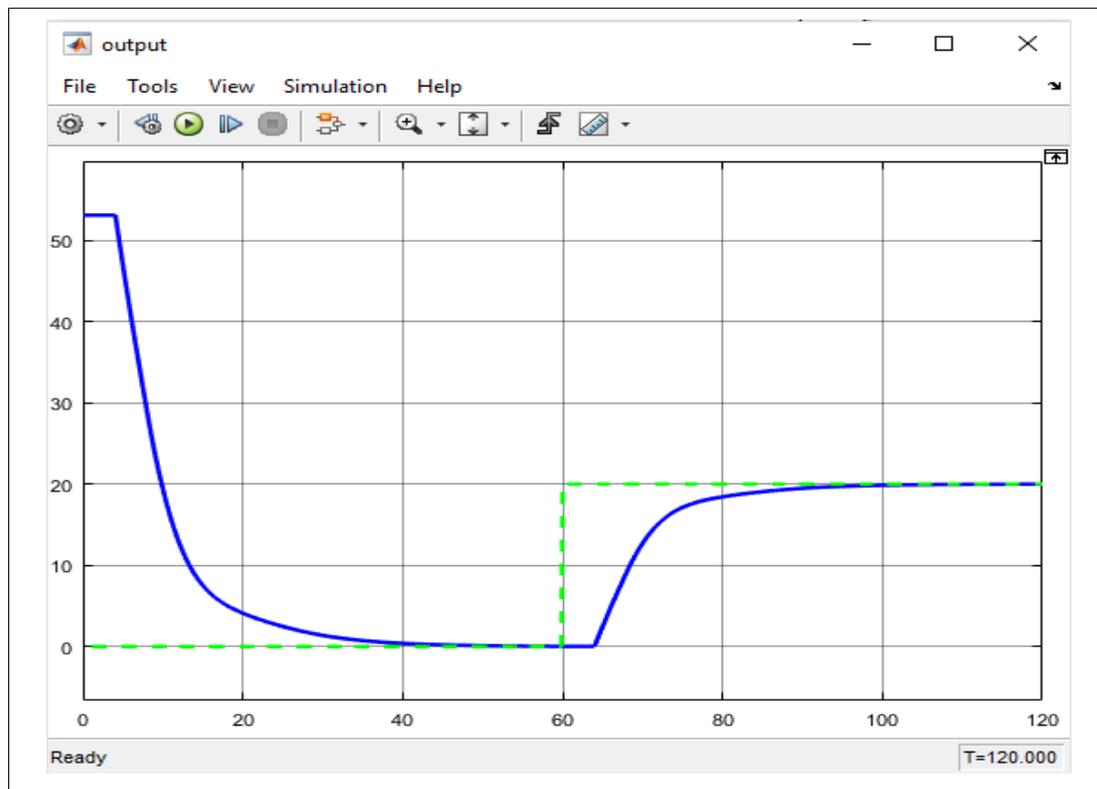


Figure 3.7 : Dynamique de poursuite de la consigne imposée par l'utilisateur.

D'après la Figure 3.7, il est clair d'observer l'effet du retard put lors de la fermeture et l'ouverture de la vanne d'alimentation, qui est estimé par un temps de 5 secondes. De plus, cette figure montre clairement le temps nécessaire pour stabiliser la boucle de commande et qui est estimé par 20 secondes. La dynamique de poursuite est caractérisée par une erreur de poursuite très réduite notamment en régime permanent et un dépassement presque nul en régime transitoire.

3.4 Implémentation du contrôleur PI dans la boucle de commande

La figure 3.8 représente comment installé le contrôleur PI précédent dans la boucle existant dans le laboratoire cité précédemment. Ici le contrôle global du prototype du canal d'irrigation est assuré par une boucle primaire contrôlée par contrôleur PID. Ce dernier alimente le premier bassin « *upstream pool* » via la première pompe « *upstream pump* ». Une deuxième boucle de

commande est contrôlée par le second contrôleur PI synthétisé dans la partie ci-dessus. Ce contrôleur permet de commander le second moteur à courant continu pour le réglage de niveau (voir la Figure 3.8).

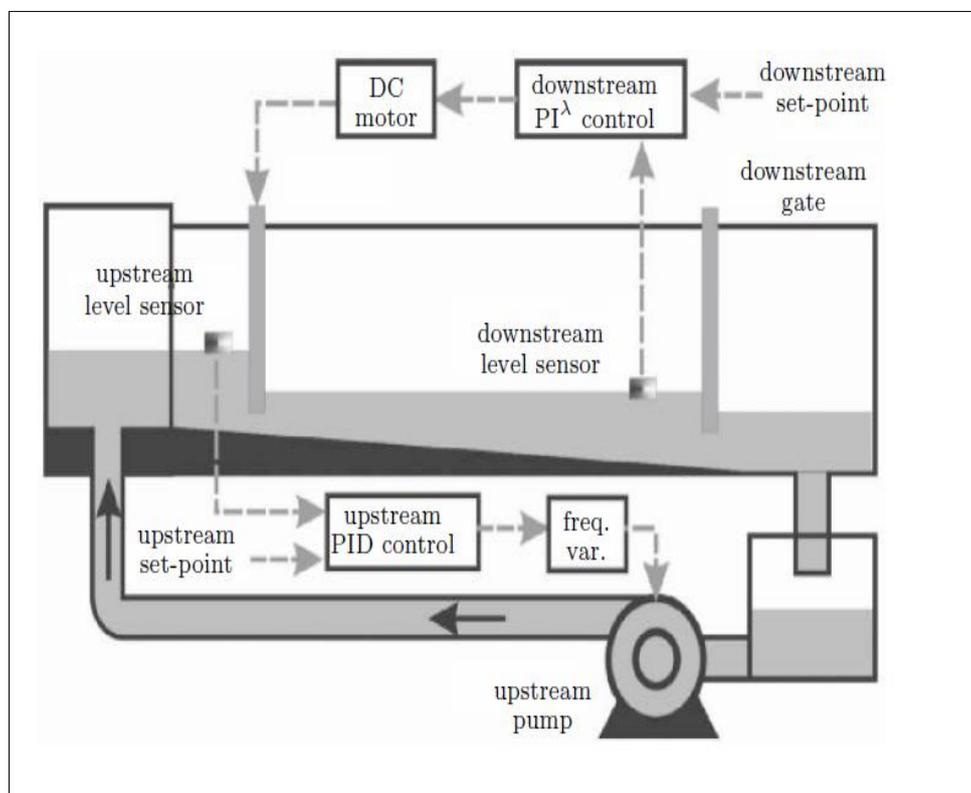


Figure 3.8 : Système de contrôle global du prototype de canal d'irrigation.

Il est à noter que les grandeurs à régler dans ces deux boucles imbriquées sont fortement couplées ce qui complique la tâche du contrôleur PI. Car les manœuvres d'ouverture et de fermetures de la porte en amont entraînent de très fortes variations des niveaux d'eau amont. Afin de résoudre ce problème, la dernière boucle de commande est remplacée par celle basée sur le principe de prédicteur de Smith, illustré dans la section ci-dessous [11].

3.5 Commande par Prédiction

Les techniques de commande basées sur la prédiction consistent à rendre le système en boucle fermée de dimension finie, ceci est réalisé par l'utilisation des prédicteurs qui permettent de compenser le retard.

3.5.1 Prédicteur de Smith

Ce type de commande a été proposé par Smith à la fin de l'année 1950, pour les systèmes comportant des retards purs importants. Ce prédicteur a pour objectif de compenser l'effet du retard dans la boucle de commande. Le schéma fonctionnel du prédicteur de Smith est donné par la Figure 3.9.

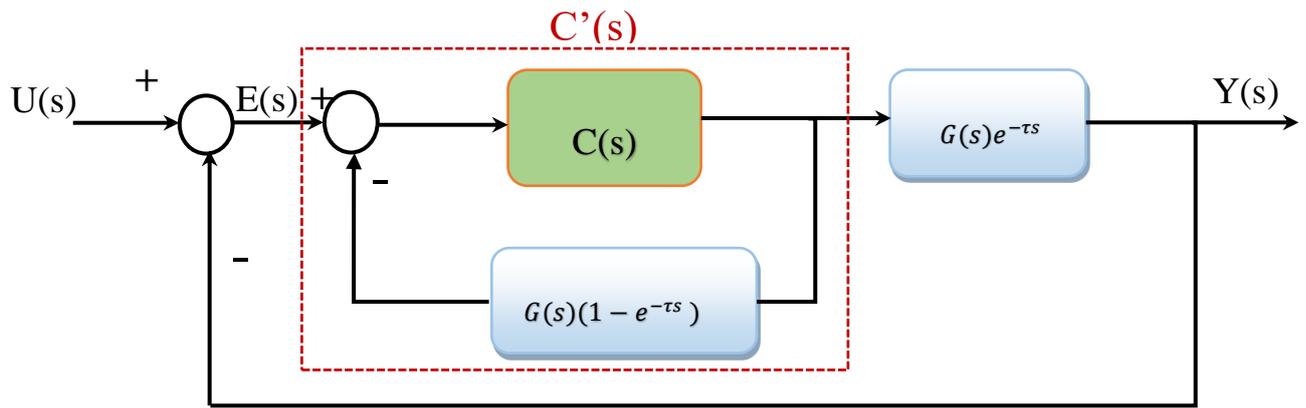


Figure 3.9 : Implémentation d'un contrôleur type Prédicteur de Smith.

Cette méthode comporte deux étapes de base. La première étape consiste à déterminer un contrôleur sans prendre le retard en considération. La deuxième étape consiste à implémenter le contrôleur précédent dans le schéma de commande de tel sort que l'effet du retard est éliminé en utilisant comme rétroaction la prédication de la grandeur à régler [10]. Pour atteindre ces deux objectifs, considérons le modèle à retard important fourni par le transfert $G(s)e^{-\tau s}$. On détermine tout d'abord le contrôleur $C(s)$ pour la partie sans retard $G(s)$, on lui ajoute ensuite le retour $G(s)(1 - e^{-\tau s})$ dans la boucle interne du système bouclé. Ce retour appelé Prédicteur de Smith. Le contrôleur de Smith est donc présenté par le transfert:

$$C'(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G(s)(1 - e^{-\tau s})} \quad (3.1)$$

Cependant, la fonction de transfert du système en boucle fermée est celle donnée par :

$$H(s) = \frac{Y(p)}{u(p)} \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} e^{-\tau p} \quad (3.2)$$

L'un des principaux avantages d'un prédicteur basé sur Smith est la suppression du temps de retard du dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée. Le prédicteur de Smith est un contrôleur simple et efficace pour les processus de retard pur. Comme le canal d'irrigation est caractérisé par un retard pur important, et c'est pour cela qu'il faut utiliser le principe de Smith pour compenser l'effet du retard dans la boucle de commande. Afin de montrer l'efficacité du principe Smith sur le canal d'irrigation, on utilise le schéma de commande illustré dans la Figure 3.10.

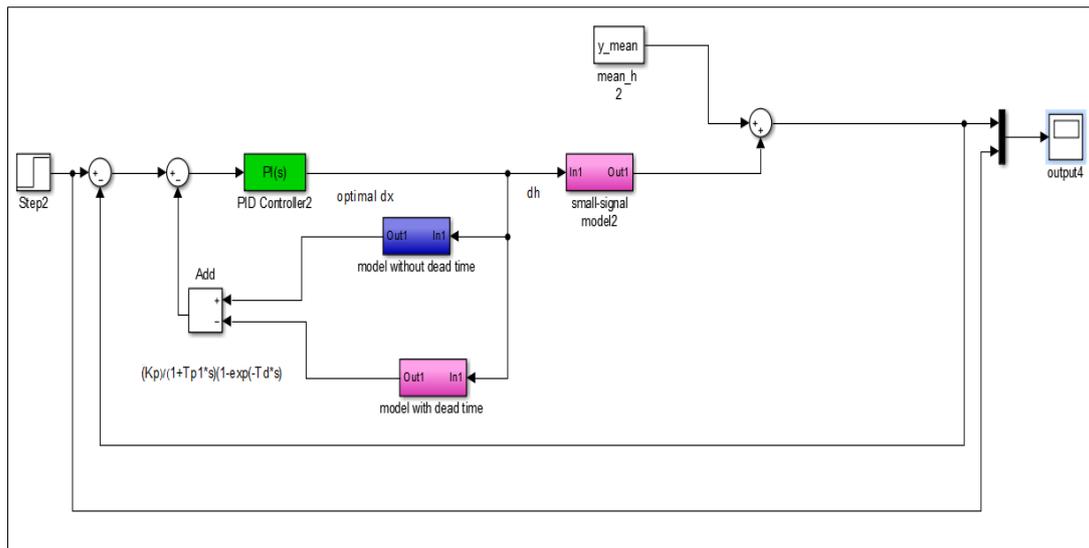


Figure 3.10 : Simulation de prédicteur de Smith.

La réponse du système bouclé pour l'entrée de consigne citée précédemment est présentée dans Figure 3.11 comme suit :

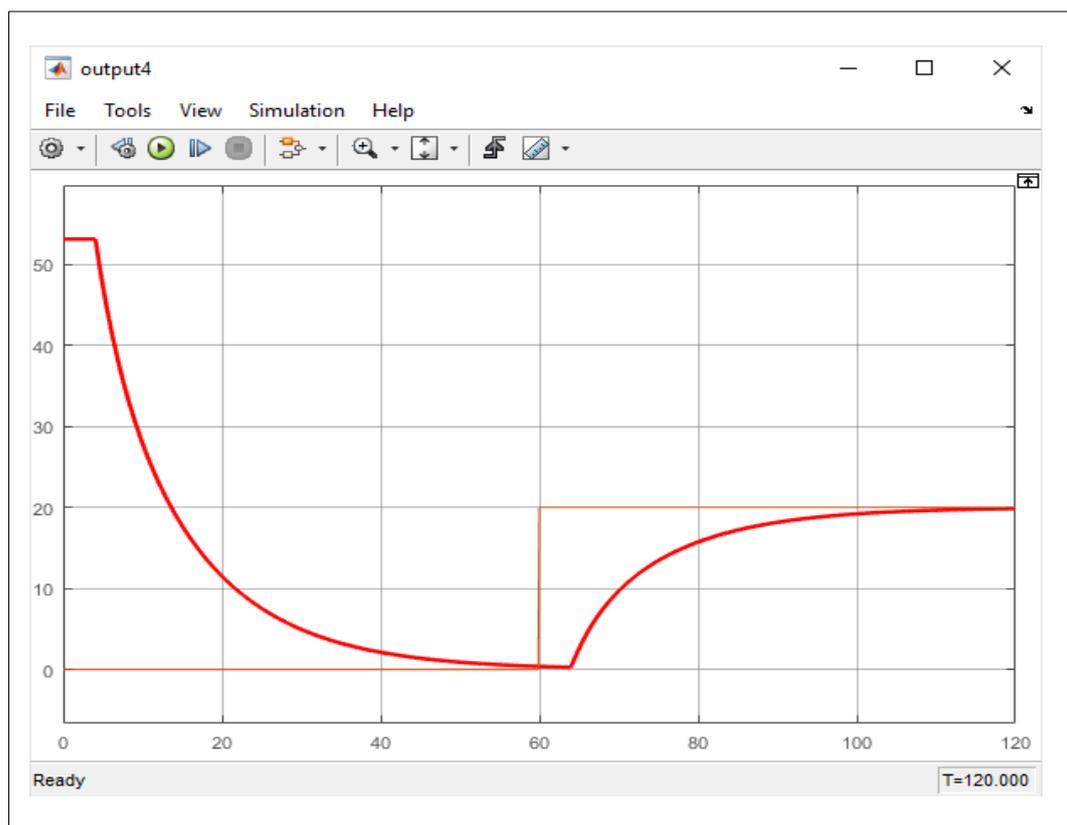


Figure 3.11 : La réponse à la consigne pour le prédicteur de Smith.

La comparaison des performances du système bouclé suivant le principe du prédicteur de Smith et celle fournies par le contrôleur PI est effectuée suivant le schéma Simulink, illustré dans la Figure 3.12.

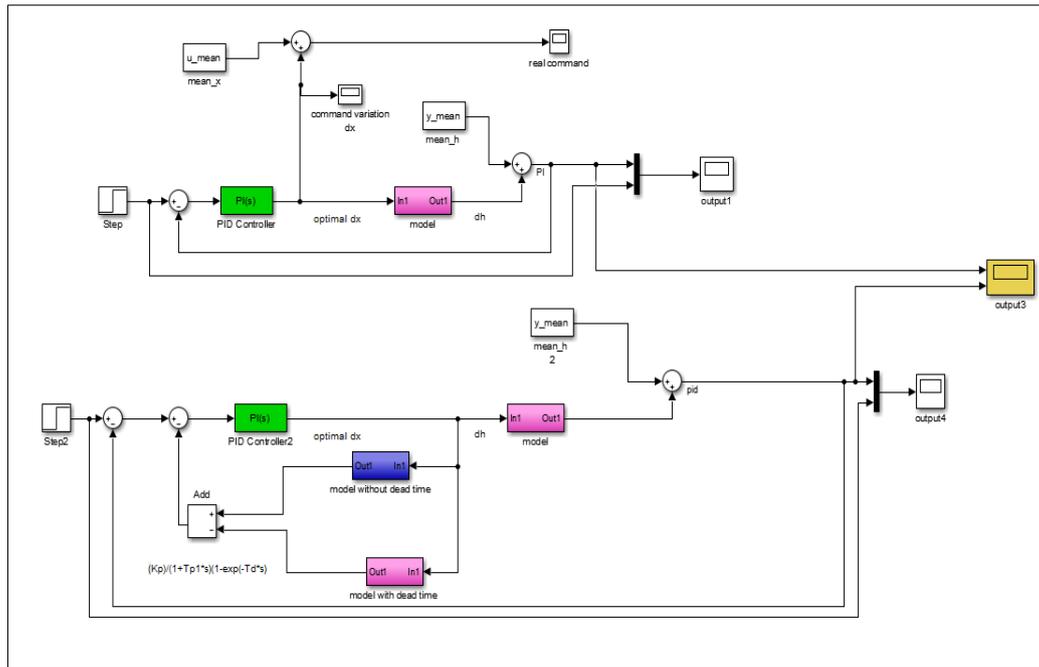


Figure 3.12 : Comparaison entre le correcteur PI et le prédicteur de Smith.

Pour la même entrée de consigne, on obtient les deux réponses illustrées dans la Figure 3.13 ci-dessous :

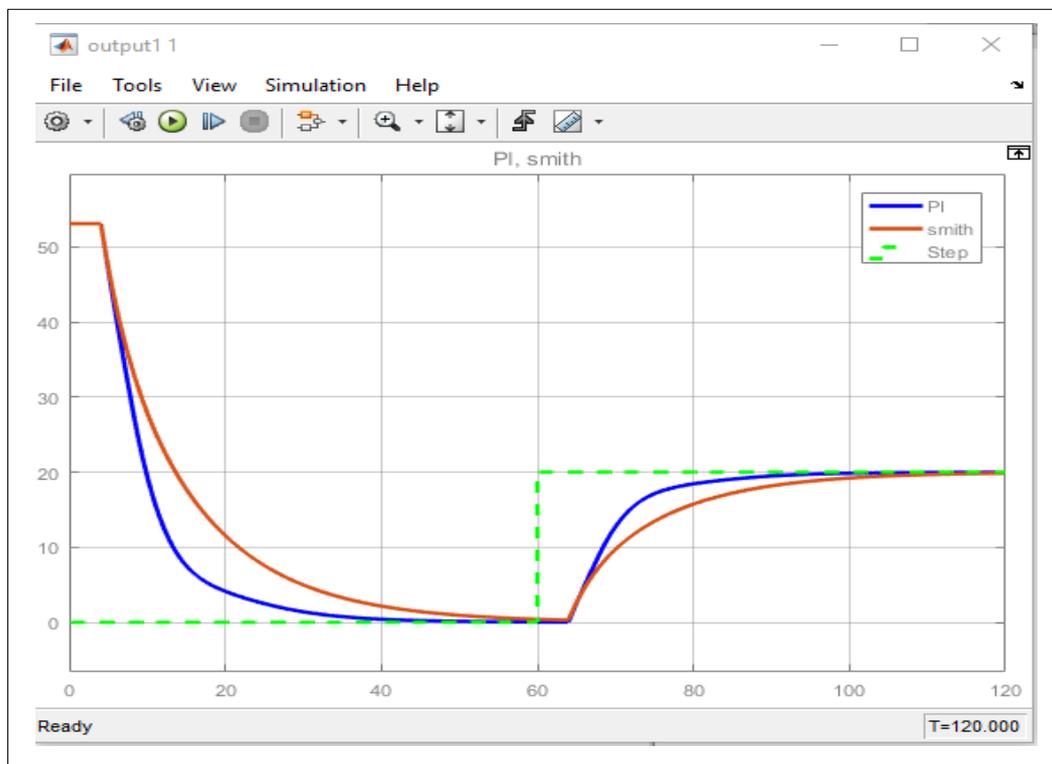


Figure 3.13 : Comparaison des deux réponses fournies par le correcteur PI et le prédicteur de Smith.

La Figure 3.13 montre clairement que la réponse du contrôleur PI est meilleure, du point de vue théorique, en comparaison à celle fournie par le contrôleur basé sur le principe du prédicteur de Smith. Cependant, De point de vue pratique, le réglage basé sur le principe de prédicteur de Smith est le plus efficace en termes de réduire l'effet de retard et la rejection des perturbations.

3.6 Conclusion

Après avoir conçu le contrôleur PI pour le système d'irrigation, le système bouclé correspondant demeure stable et la réponse correspondante est caractérisée par un dépassement faible et erreur de poursuite très réduite. Cependant, ces performances ne sont pas garanties en pratique à cause de l'effet important du retard ainsi que les bruits de mesure et c'est pour ces raisons qu'on doit appliquer la commande basée sur le principe du prédicteur de Smith. La structure de contrôleur basé sur ce principe a la capacité de fournir une bonne compensation de l'effet de retard pur. En outre, à partir de résultats de comparaison entre les performances du contrôleur PI et de Smith Prédiction pour les processus à retard pur, nous avons constaté à travers des résultats de simulation qu'un meilleur comportement de poursuite est celui assuré par le contrôleur PI. Par contre, l'essai expérimental a montré la robustesse du système bouclé basé sur le principe de prédicteur de Smith.

Conclusion générale

Aujourd'hui, on doit rechercher une meilleure valorisation de l'eau (*more crop per drop*), notamment pour l'usage agricole qui est largement dominant. Les réseaux classiques, les plus nombreux et les plus consommateurs d'eau, doivent adapter leur gestion et chercher des méthodes permettant de contrôler automatiquement ce type de réseaux.

Cependant, ce travail entre dans le cadre du contrôle automatique des canaux d'irrigation, le contrôle du canal a géré la distribution d'eau en contrôlant automatiquement les vannes, les pompes et autres appareils en fonction de l'heure. On peut définir un canal d'irrigation comme un système hydraulique à surface libre, dont l'objectif est principalement de transmettre de l'eau de sa source amont (le barrage) à ses utilisateurs finaux aval (des agriculteurs). Des structures en travers (principalement des vannes) sont manœuvrées pour contrôler les niveaux d'eau, des débits et/ou des volumes le long de ce canal.

Dans un premier temps, nous avons vu le principe de fonctionnement du canal d'irrigation, et une étude bibliographique détaillée sur le principe de fonctionnement de canal, basée sur les quatre concepts qui caractérisent toute méthode de régulation : les variables contrôlées, la logique de contrôle, la méthode de synthèse de contrôleur et sa mise en œuvre. En outre, les différents termes utilisés pour décrire la méthode de régulation des canaux ont alors pu être définis en référence aux quatre concepts évoqués. En particulier, les notions souvent citées par les hydrauliciens de commande par l'amont et de commande par l'aval ont pu être définies en référence au concept de logique de contrôle. La commande basée sur un modèle mathématique représentant comme système réel qui basé sur les équations de Saint-Venant. Ces équations sont en effet bien connues et représentent de manière très satisfaisante la dynamique du système de canal. Cependant, ce système décrit par des équations aux dérivées partielles qui caractérisées par la non-linéarité, pour lequel peu de techniques de contrôle sont disponibles. Nous avons également vu comment linéariser ce type d'équations par la méthode de Newton, et par la méthode de Padé, ce qui simplifie l'analyse et la conception du modèle à retard pur simulant le comportement réel du système d'irrigation.

Nous avons étudié, dans un deuxième temps la modélisation paramétrique et l'identification de système du canal d'irrigation. La modélisation du canal est nécessaire pour définir les actions de contrôle à l'aide des données d'entrée-sortie d'un modèle informatique, définissant ainsi la dynamique d'un système de canaux qui peut être correctement approximée par les équations de Saint-Venant. Nous avons obtenu un modèle mathématique représentant la

relation entre l'ouverture de la vanne en amont et la hauteur de l'eau en aval au long du canal d'irrigation. Ce modèle a été utilisé pour effectuer des prédictions de la sortie du processus et pour la conception du meilleur contrôleur. Nous avons également vu le modèle de premier ordre à retard pur pour le but de la conception du contrôleur. Ensuite, nous avons réalisé l'identification des paramètres du modèle pour améliorer la qualité d'estimation des paramètres du canal d'irrigation par l'utilisation de l'interface graphique de la bibliothèque d'identification Toolbox de Matlab. Après l'identification, on trouve que l'optimisation des paramètres du modèle fournit une bonne description du comportement réel et très proche de la réalité pour le fonctionnement du canal d'irrigation.

Finalement, nous avons fait la commande du canal d'irrigation et cela a travers d'une conception d'un contrôleur adéquat à partir du modèle d'identification. Le principal objectif de la synthèse du contrôleur est d'améliorer la rapidité de la réponse du système en boucle fermée, d'augmenter la précision, d'éliminer les erreurs de poursuite et d'augmenter la marge de stabilité en présence des incertitudes de modélisation.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons mené une expérience prototype d'un canal d'irrigation au Laboratoire de mécanique des fluides de l'Université de Castille-La Manche en Espagne. Après la simulation, nous avons extrait un modèle d'identification et nous avons conçu un contrôleur PI pour assurer la stabilité et certaines performances du système bouclé.

Le système de canal d'irrigation qui possède un temps de retard important, influe sur le bon fonctionnement du contrôleur qui stabilise le système bouclé. L'influence de ce retard est importante sur la robustesse de la commande et la stabilité des systèmes elle-même. Pour compenser l'effet de retard, nous avons proposé une synthèse de contrôleur basée le principe de Smith prédictif pour surmonter les inconvénients de la présence du temps de retard.

La comparaison entre les performances du contrôleur PI et celles fournies par le contrôleur du prédictif de Smith pour les processus à retard pur est faite. Nous avons constaté que le résultat obtenu avec le correcteur PI est le meilleur en termes de poursuite. De plus, le temps de réponse fourni par le système bouclé par le contrôleur PI est plus rapide par rapport à celui produit par le contrôleur du prédictif de Smith. Les résultats de simulation montrent que, le contrôleur proposé améliore la robustesse du système réel. En outre, un bon suivi de comportement pour la référence, une bonne atténuation de la perturbation de charge dynamique et une minimisation de l'effet de bruits de capteur et du coût d'énergie a été garantie par le contrôleur du prédictif de Smith.

Perspectives

Plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés pour faire suite à ces travaux sur la commande des systèmes d'irrigation et comment les modéliser et contrôler en présence des effets exogènes. Parmi ces perspectives, il est important de noter que :

- ✎ Ce travail repose sur toute une série de tests faits sur le canal d'irrigation, il serait donc intéressant de pouvoir valider ces résultats sur un banc d'essais expérimental, et cela pour tous les points étudiés ici, à savoir la modélisation, la commande, l'observation.
- ✎ La gestion automatisée du canal d'irrigation est souvent très médiocre à cause de la défaillance des équipements et des algorithmes de régulation, il serait donc intéressant d'utiliser des capteurs intelligents et de disposer d'un ordinateur plus puissant et plus rapide.
- ✎ Un autre point important à rappeler est que ce mémoire a été réalisé sur la base de modèles d'un canal de section rectangulaire, il serait donc intéressant d'étendre des résultats à des canaux de section de géométrie différente, par exemple trapézoïdale qui est la plus utilisée dans les systèmes d'irrigation.
- ✎ La proposition des algorithmes de régulation plus robustes face aux changements de conditions hydrauliques (débits forts ou faibles, ouvertures des vannes, changement du gabarit des canaux par éboulement ou sédimentation, etc.)

Références bibliographie

- [1] Bonet Gil, Enrique « Experimental Design and Vérification of a Centralized Controller for Irrigation Canals » livre 2018.
- [2] GACEM Salah Eddine « identification des systèmes non linéaire par réseau de neurones» mémoire magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 08/10/2015.
- [3] Pierre-Olivier Malaterre « Le contrôle automatique des canaux d'irrigation : état de l'art et perspectives » Colloque Automatique et Agronomie, Montpellier 22-23-24 Janvier 2003.
- [4] BOUGUERRA Islam et KHALFAOUI Ismail « Identification paramétrique basée Sur la prédiction et application au signal de parole » mémoire master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2016-2017.
- [5] Riadh DJABRI « Synthèse d'un Prédicteur de Smith (SP) par l'utilisation des transferts d'ordre non entier » thèse de doctorant, Université de 08 mais 1945, Guelma, 04/07/2018
- [6] Raymond Gorez, Petr Klán « Simple Models for Process Control » Institute of Computer Science, 182 07 Prague 8, Pod vodarenskou vezi 2, Czech Republic
- [7] Rivas Perez R, Feliu Batlle V, Castillo Garcia F, Linarez Saez A. « System identification for control of a main irrigation canal pool »The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008
- [8] Saddam Gharab , Vicente Feliu-Batlle , and Raul Rivas-Perez, « A Fractional-Order Partially Non-Linear Model of a Laboratory Prototype of Hydraulic Canal System » Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, Spain 21 March 2019
- [9] X. Litrico and V. Fromion « Tuning of Robust Distant Downstream PI Controllers for an Irrigation Canal Pool »
- [10] Boudouda Abdelhalim « synthèse d'un contrôleur robuste par le principe de prédicteur de Smith » mémoire master 2013, Université 08 mais 1945 Guelma
- [11] Concepción A Monje, Yangquan Chen, Blas M Vinagre, Dingyü Xue, Vicente Feliu « Fractional-order Systems and Controls » livre 2010. Le nom de l'éditeur Springer, London.

Résumé

Ce rapport de mémoire a pour but de résumer le travail de recherche sur la commande du canal d'irrigation à surface libre, et pour cela nous avons étudié une méthode innovante et technique pour concevoir un système automatique robuste pour maintenir le niveau d'eau dans le canal d'irrigation et éliminer les négatifs de Pénurie d'eau.

Il est divisé en trois grandes parties, une première partie présente la description de système d'irrigation en mettant les équations non linéaires de leur dynamique et le principe de fonctionnement d'un canal, ainsi que quelque notion logique de contrôle de système.

La deuxième partie présente la modélisation et l'identification paramétrique du modèle du premier ordre mené par un retard pur important.

La troisième partie est dédié au développement de la loi de la commande en utilisant la structure du contrôleur PI et ensuite la structure basée sur le principe du prédicteur de Smith. Ceci a pour objectif d'améliorer la robustesse et la dynamique de poursuite de la trajectoire de référence. Les résultats de comparaison entre les performances du contrôleur PI et celles du prédicteur de Smith ont montré l'efficacité du contrôleur PI en termes de poursuite et l'efficacité de l'autre contrôleur en termes de régulation.

Mots clés :

Commande non linéaire, linéarisation entrée-sortie, l'identification, la modélisation, Smith prédicteur

الملخص:

يهدف تقرير الأطروحة هذا إلى تلخيص العمل البحثي حول التحكم غير الخطي في قناة الري السطحية الحرة ، ولهذا قمنا بدراسة طريقة مبتكرة وتقنية لتصميم نظام آلي قوي للحفاظ على مستوى المياه في قناة الري والقضاء على سلبيات نقص المياه

تنقسم المذكرة إلى ثلاثة أجزاء رئيسية :

يقدم الجزء الأول وصفاً لنظام الري من خلال وضع المعادلات غير الخطية لديناميكياتها ومبدأ تشغيل القناة ، بالإضافة إلى بعض المفاهيم المنطقية للتحكم في النظام

الجزء الثاني يعرض النمذجة وتحديد النظام الذي حصلنا عليه وهو نموذج يمثل نظاماً حقيقياً لتطبيق قانون التحكم

الجزء الثالث مخصص لتطوير قانون التحكم غير الخطي لهذا قمنا بتطبيق وحدة تحكم PID ثم متحكم سميث المتنبئ على نظام الحلقة المغلقة لتحسين متانة الأداء في نظام قناة الري ، نتائج المقارنة بين أداء وحدة التحكم PI و Smith Prediction لقد لاحظنا أن النتيجة التي تم الحصول عليها باستخدام مصحح PI هي الأفضل وعلاوة على ذلك ، فإن وقت استجابة وحدة التحكم PI يكون أسرع مقارنةً بمتنبئ سميث.

الكلمات المفتاحية :

التحكم غير الخطي ، خطي المدخلات والمخرجات ، التحديد ، النمذجة ، توقع سميث

Abstract

This thesis report aims to summarize the research work on the nonlinear control of free surface irrigation canal, and for this, we have studied an innovative and technical method to design a robust automatic system to maintain the level of water in the irrigation canal and eliminate the negatives of Water shortage. The report is divided into three main parts, a first part presents the description of the irrigation system by putting the nonlinear equations of their dynamics and the operating principle of a canal, as well as some logical notion of system control. The second part presents the modeling and identification of the system we obtained a model represents a real system to apply the control law. The third part is dedicated to the development of the law of nonlinear control for this we applied a PID controller and then a predictor Smith controller on the close loop system to improve the robustness of the performance in the irrigation canal system, comparison results between PI controller performance and Smith Prediction. We have observed that the result obtained with the PI corrector is the best and the response time of the PI controller is faster compared to the Smith predictor.

Keywords:

Nonlinear control, input-output linearization, identification, modeling, Smith predictor.