

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur  
Département : Electronique

Année : 2020 /2021

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle

### Intitulé

**Commande Robuste pour Systèmes d'irrigation**

Option : Automatique

Par : MERABTI Nardjes

Rapporteur : ARBAOUI Fayçal Pr. Université Badji Mokhtar Annaba  
Co-rapporteur : SAIDI Mohammed Larbi Pr. Université Badji Mokhtar Annaba

### DEVANT Le JURY

Pr GUERSI Noureddine	Président	Université Badji Mokhtar Annaba
Pr ABBASSI Hadj Ahmed	Examineur	Université Badji Mokhtar Annaba
Pr MOUSSAOUI Abdelkrim	Examineur	Université 08 Mai 1945 Guelma
Pr YAHMEDI Saïd	Invité	Université Badji Mokhtar Annaba

## Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué, au Laboratoire d'Automatique et Signaux Annaba, LASA, à l'université Badji Mokhtar Annaba.

Avant tout, louange à Dieu le tout puissant pour m'avoir aidé et permis d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Professeur ARBAOUI Fayçal, mon directeur de thèse, pour l'accueil qu'il m'a offert dans son équipe, pour ses qualités humaines, le temps et l'intérêt qu'il m'a consacré au niveau de la documentation et de l'orientation.

Je remercie également Monsieur SAIDI Mohammed Larbi, mon co-directeur de thèse, Professeur à l'université d'Annaba.

De la même manière je remercie Monsieur YAHMEDI Saïd, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, pour m'avoir aidé à améliorer mes connaissances en Automatique robuste, pour le suivi de mes travaux de recherche et pour le temps qu'il m'a consacré lors de la correction des publications.

Je tiens aussi à remercier Professeur GUERSI Noureddine pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mes travaux et de présider mon jury de thèse.

Je remercie également le Professeur ABBASSI Hadj Ahmed pour m'avoir toujours encouragé à terminer ma thèse et d'avoir bien voulu juger ce travail.

Je tiens aussi à remercier le Professeur MOUSSAOUI Abdelkrim pour avoir accepté de rapporter cette thèse de Doctorat.

J'aimerais remercier mes chers parents, pour m'avoir toujours encouragée à poursuivre mes études et pour m'avoir permis d'arriver là où j'en suis, aucun mot ne saurait exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à leur égard ; je remercie également mes frères et sœurs pour leur aide morale et leur présence toujours à côté de moi au cours de mes études.

Je réserve une pensée toute particulière aux collègues qui ont croisé ma route tout au long de ces années, qui m'ont toujours encouragé de près ou de loin à continuer malgré les difficultés. Je n'oublierai pas de remercier toutes les personnes qui m'ont soutenue.

Finalement, mais sans doute pas en dernier lieu, je voudrais adresser les grands mots à mon cher époux, pour le remercier pour son soutien et ses encouragements permanents.

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents*

*A mes frères et sœurs*

*A mon cher mari et mes princesses*

***Mayssam et Miral***

## ملخص

تخضع قنوات الري في بعض الأحيان لتغيرات شديدة بسبب تغير المناخ وسوء الأحوال الجوي. لهذه الأسباب، فإن الهدف من هذا العمل هو تطوير عنصر تحكم مع الأخذ في الاعتبار أهداف الأداء المحددة وقيود المتانة لتنظيم مستوى المياه في القناة.

في العمل الحالي، نحن مهتمون بالتحكم في قنوات الري حيث تتم معالجة عدة أنواع من أنظمة التحكم، ويقترح وحدة تحكم قوية تسمح بالتعامل مع التغيرات الكبيرة في ظروف التشغيل للتحكم في مستوى المياه من قناة ري نموذجية مفتوحة على واحد أو أكثر من فتحات التحويل حيث يتم تصور أنظمة أحادية المتغير ومتعددة المتغيرات. تقترح هذه الرسالة العديد من التقنيات للعديد من أجهزة التحكم المطبقة على أتمتة القنوات الرئيسية لنظام الري. ونظرًا لوجود تباين كبير في جميع إعدادات هذه الأنظمة، قمنا بتصميم وضبط طريقة المكاسب الرئيسية لوحدة تحكم قوية باستخدام مواصفات المجال الزمني. تتم مقارنة وحدة التحكم المصممة بوحدة التحكم القياسية PID للنظام المتعدد المتغيرات. تم تصميم وحدة تحكم توقع سميث (Smith) المصفاة أيضًا بنفس النموذج. ضبط كل وحدات التحكم يأتي لتلبية نفس مواصفات الزمن في حالة ديناميكيات القناة الاسمية.

في بعض القنوات، يمكن أن تخضع معلمات التثبيت لتغيرات كبيرة تقلل من الأداء ويمكن أن تزعزع استقرار نظام الحلقة المغلقة. من أجل ذلك، تم تصميم وحدة تحكم قوية تعتمد على طريقة المكاسب الرئيسية لوحدة تحكم متعددة المتغيرات لضمان المتانة في مواجهة التغيرات في هذه المعلمات. تم اختبار وحدة التحكم هذه عن طريق المحاكاة لظروف تشغيل مختلفة، وتتم مقارنة نتائج المحاكاة بالنتائج التي تعالج نفس المشكلة، حيث تظهر تحسينات في المتانة التي تم الحصول عليها باستخدام وحدة التحكم هذه مقارنةً بوحدات التحكم التقليدية PID، وهذا يشهد ويؤكد السلوك الجيد والكفاءة لوحدة التحكم المصممة.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة الري، تحكم قوي، أنظمة التحكم

## Résumé

Les canaux d'irrigation sont parfois soumis à des variations intenses dues au changement climatique et aux intempéries. Pour ces raisons, l'objectif de ce travail est d'élaborer une commande prenant en compte des objectifs précis de performances et des contraintes de robustesse pour réguler le niveau d'eau dans un canal.

Dans le présent travail, nous nous intéressons à la commande des canaux d'irrigation où plusieurs types de commande sont traités. Un contrôleur robuste qui permet de faire face à de grandes variations dans les conditions de fonctionnement est proposé pour contrôler le niveau d'eau d'un prototype canal d'irrigation ouvert à un et plusieurs biefs mettant en évidence des systèmes mono-variables et multi-variables. Cette thèse propose de nombreuses techniques pour de nombreux contrôleurs appliquées à l'automatisation de canaux d'irrigation principaux. Plusieurs techniques de commande ont été développées, étant donné qu'une grande variation des paramètres de l'installation est présente dans de tels systèmes. La méthode des gains principaux pour un contrôleur robuste est conçue en utilisant des spécifications du domaine temporel. Le contrôleur conçu est comparé au contrôleur PID standard. Un contrôleur par prédicteur de Smith filtré est également conçu avec le même modèle. Tous ces contrôleurs sont réglés pour répondre aux mêmes spécifications de temps dans le cas de la dynamique nominale du canal. Dans certains canaux, les paramètres du système peuvent subir des changements importants qui diminuent les performances et peuvent même déstabiliser le système en boucle fermée. Ensuite, un contrôleur robuste basé sur la méthode des gains principaux est conçu pour un contrôleur afin de garantir la robustesse aux variations de ses paramètres, le principe de la commande robuste est de déterminer une loi de commande qui assure les propriétés du modèle pour toute la gamme d'incertitudes possibles. Ce contrôleur est testé en simulation pour différentes conditions de fonctionnement, les résultats simulés sont comparés à des résultats qui traitent la même problématique. Des améliorations en termes de robustesse ont été obtenues avec ce contrôleur comparativement aux contrôleurs PID conventionnels ce qui atteste le bon comportement et l'efficacité du contrôleur conçu.

Mots clés : systèmes d'irrigation, commande robuste, commande des systèmes

## **Abstract**

Irrigation canals are sometimes subject to intense variations due to climate change and bad weather. For these reasons, the objective of this work is to develop a control taking into account specific performance objectives and robustness constraints to regulate the water level in a channel.

In the present work, we are interested in the control of irrigation canals from where several types of control are processed. We propose a robust controller that allows coping with large variations in the operating conditions to control the level of water from a prototype open irrigation canal open to one or more diversion bays where mono-variable and multi-variable systems are envisaged. This thesis proposes many techniques for many controllers applied to the automation of the main channels of an irrigation system. Since large variations of all plant parameters are present in such systems, the principal gains method for a robust controller is designed using time domain specifications. The designed controller is compared to the standard PID controller for the multivariable system. A filtered Smith predictor controller is also considered with the same model. All of these controllers are tuned to meet the same time specifications in the case of nominal channel dynamics. In some channels, the installation parameters can undergo significant changes that decrease the performance and can even destabilize the closed loop system. Then, a robust controller based on the principal gains method is proposed for to ensure robustness to variations in these parameters. This controller is tested in simulation for different operating conditions. The simulated results are compared to the results that deal with the same problematic. We obtained improvements in robustness with this controller comparatively to conventional PID controllers, which attests to the correct behavior and the efficiency of the designed controller.

**Keywords:** Irrigation systems, robust control, systems control

## **LISTE DES PUBLICATIONS**

Le travail présenté dans cette thèse a donné lieu à un certain nombre de publications :

### **REVUES INTERNATIONALES**

- "Robust controller for an open irrigation canal prototype", Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 17, No. 1, January 2020, pp. 237-247.
- "Robust Control for Irrigation Canals", International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) vol.1, pp59-63, 2014.

### **CONFERENCES INTERNATIONALES**

- "Robust Control for Irrigation canals", International conference on control, engineering and information technology Canals 04-04 June 2013 Sousse Tunisia.
- "Dead Time Compensation of Main Irrigation Canal using a Filtered Smith Predictor", International Conference on Automatic control, Telecommunications and Signals (ICATS15) University BADJI Mokhtar - Annaba - Algeria - November 16-18, 2015.

### **CONFERENCES NATIONALES**

- "Robust control design for irrigation main canal pools", Workshop sur la modélisation mathématique et contrôle Annaba Mai 20-22 2013.

## Liste des figures

<i>Figure 1. 1. Présentation simplifiée d'un système d'irrigation</i> .....	7
<i>Figure 1. 2. Photo d'un canal d'irrigation</i> .....	8
<i>Figure 2. 1. Représentation schématique d'un système soumis à un processus de contrôle</i> ...	17
<i>Figure 2. 2. Procédé à commander</i> .....	17
<i>Figure 2.3. Canal d'irrigation</i> .....	18
<i>Figure 2. 4. Schéma représentant les différents régimes d'écoulement dans un canal</i> .....	19
<i>Figure 2.5. Représentation simplifiée d'un bief</i> .....	20
<i>Figure 2.6. Deux biefs d'un canal d'irrigation avec portes coulissantes</i> .....	20
<i>Figure 2.7. Représentation schématique de deux biefs séparés par une vanne</i> .....	21
<i>Figure 3.1. Directions du contrôle</i> .....	32
<i>Figure 3.2. Contrôle en boucle fermée d'un système d'irrigation</i> .....	32
<i>Figure 3.3. Logique de contrôle boucle ouverte boucle fermée</i> .....	33
<i>Figure 3.4. Logique de contrôle boucle ouverte boucle fermée à deux étapes</i> .....	35
<i>Figure 3.5. Système SISO et Système MIMO</i> .....	39
<i>Figure 3.6. Configuration des systèmes multi-variables</i> .....	40
<i>Figure 3.7. Schéma fonctionnel</i> .....	43
<i>Figure 3.8. Configuration générale d'un système bouclé perturbé soumis à des perturbations additives</i> .....	44
<i>Figure 3.9. (a)(b) configuration générale d'un système bouclé soumis à des perturbations multiplicatives</i> .....	44
<i>Figure 3.10. Configuration d'un système bouclé avec des perturbations multiplicatives</i> .....	50
<i>Figure 3.12. Le prédicteur de Smith Filtré</i> .....	58
<i>Figure4. 1. Incertitudes multiplicatives <math>\Delta m(s)</math></i> .....	61
<i>Figure4. 2. Conditions de robustesse</i> .....	62
<i>Figure4. 3. Résultat fréquentiel : Condition de robustesse sur la stabilité et les performances</i> .....	63
<i>Figure4. 4. (a)(b)(c)(d)(e) Réponses échelonnées du régime nominal et des régimes perturbés du canal d'irrigation</i> .....	66
<i>Figure4. 5. Réponse en boucle fermée par contrôleur PI</i> .....	69
<i>Figure4. 6. Réponse en boucle fermée du contrôleur PID</i> .....	69
<i>Figure4. 7. Réponse en boucle fermée par contrôleur SP</i> .....	70
<i>Figure4. 8. Comparaison de rejet de perturbations</i> .....	70
<i>Figure4. 9. Réponse en boucle fermée contrôleur FSP au niveau d'eau</i> .....	71
<i>Figure4. 10. Supériorité du FSP en termes de rejet de perturbations</i> .....	72
<i>Figure4. 11. Réponse en boucle fermée des modèles nominales et perturbées</i> .....	73
<i>Figure4. 12. Diagramme de Bode montrant la plus grande bande passante du FSP</i> .....	73
<i>Figure4. 13. Diagramme de Bode des systèmes : nominal et perturbés</i> .....	74
<i>Figure4. 14. Schéma simplifié du canal à trois biefs</i> .....	75
<i>Figure4. 15. Les gains principaux</i> .....	77
<i>Figure4. 16. Conditionnement</i> .....	77

Figure4. 17. Valeurs singulières .....	78
Figure4. 18. Les valeurs singulières maximales .....	80
Figure4. 19. Les conditions de robustesse.....	80
Figure4. 20. Les gains principaux du processus .....	82
Figure4. 21. Résultats fréquentiels .....	83
Figure4. 22. Résultats Fréquentiels.....	84
Figure4. 23. Réponses temporelles pour les régimes nominales et perturbés à échelo $[1\ 0\ 0]'$ , $[0\ 1\ 0]'$ et $[0\ 0\ 1]'$ .....	86

## Liste des tableaux

Tableau 4.1. Résultats des performances obtenues .....	68
Tableau 4.2. Paramètres des contrôleurs résultant .....	68
Tableau 4.3. Différents points de fonctionnement .....	75

## Liste des symboles

$t$	Variable de temps
$s$	Variable de Laplace
$u(t)$	Grandeur d'entrée
$y(t)$	Grandeur de sortie
$U(s)$	La transformée de Laplace de $u(t)$
$Y(s)$	La transformée de Laplace de $y(t)$
$G(s)$	Matrice de fonction de transfert
$C(s)$	Le contrôleur
$H_{ij}$	Fonction de transfert entre l' $i$ ème entrée et la $j$ ème sortie
$A$	Matrice d'état
$B$	Matrice de commande
$C$	Matrice d'observation
$D$	Matrice de transmission
$A^*$	Transposée conjuguée de la matrice $A$
$x(t)$	Vecteur d'état
$y(t)$	Vecteur d'observation
$u(t)$	Vecteur de commande
$\omega$	La plage fréquentielle
$\Delta m(s)$	Les incertitudes multiplicatives
$\sigma$	Les valeurs singulières
$K$	Gain statique
$n$	Dimension du système
$S(s)$	Matrice de sensibilité
$S_y(s)$	Matrice de sensibilité en sortie
$\varepsilon$	L'erreur
$r$	La référence
$P$	La perturbation
$W_p(s)$	La spécification sur les performances
$W_t(s)$	La spécification sur la stabilité
$y_p(t)$	Signal de référence
$\bar{\sigma}(A), \sigma_{max}$	La plus grande valeur singulière
$\underline{\sigma}(A), \sigma_{min}$	La plus petite valeur singulière
$\Delta_a(S)$	La matrice de transfert de l'incertitude additive
$\Delta_s(S)$	La matrice de transfert de l'incertitude multiplicative à la sortie
$\Delta_e(S)$	La matrice de transfert de l'incertitude multiplicative à l'entrée

$q$	La perturbation d'entrée
IAE	Integrated Absolute Error
ISE	Integrated Square Error
$\omega_c$	La fréquence de coupure
PI	Proportionnelle Intégrale
PID	Proportionnelle Intégrale Dérivée
SP	Smith predictor
FSP	Filtered Smith Predictor
BO	Boucle ouverte
BF	Boucle fermée
MIMO	Multi Input-Multi Output
SISO	Single Input-Single Output

## *Sommaire*

<b>Remerciements</b> .....	
<i>Dédicaces</i> .....	
ملخص .....	
<b>Résumé</b> .....	
<b>Abstract</b> .....	
<b>LISTE DES PUBLICATIONS</b> .....	
<b>Liste des figures</b> .....	
<b>Liste des tableaux</b> .....	
<b>Liste des symboles</b> .....	
<i>Sommaire</i> .....	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>Organisation de la thèse</b> .....	4
<b>CHAPITRE I : Etat de l'art</b> .....	6
1.1 Historique .....	7
1.2 Modernisation des canaux d'irrigation .....	8
1.3 Etat de l'art .....	9
<b>CHAPITRE II : Description et Modélisation d'un Canal</b> .....	15
2.1 Introduction .....	16
2.2 Représentation générale d'un système à contrôler .....	17
2.3 Description des canaux d'irrigation à surface libre .....	18
2.5.1. Le modèle du canal principal impérial d'Aragon (AIMC) .....	24
2.5.2. Le modèle du prototype de canal d'irrigation de l'institut IMTA .....	26
<b>CHAPITRE III : Différentes Stratégies de Commande</b> .....	29
3.1. Introduction .....	30
3.2. Les défis de la commande pour les canaux d'irrigation .....	30
3.3. Le contrôle automatique des canaux d'irrigation .....	31
3.3.1. Le contrôle en amont .....	31
3.3.2. Le contrôle aval .....	32
3.3.3. La logique de contrôle .....	32
3.3.3.1. Le contrôle en boucle ouverte : .....	33
3.3.3.2. Le contrôle en boucle fermée .....	34
3.4. Commande robuste par la méthode des gains principaux .....	35
3.4.1. La commande robuste .....	35
3.4.1.1. Robustesse d'un contrôleur .....	35
3.4.1.2. Synthèse de la loi de commande robuste .....	36
3.4.1.3. Spécification robuste .....	36

3.4.1.4.	Spécifications traditionnelles .....	37
3.4.2.	Le contrôle robuste des Canaux d'irrigation .....	38
3.4.2.1.	Contrôleur mono-variable et contrôleur multi-variable .....	38
3.4.2.2.	Système mono-variable SISO et Système Multi-variables MIMO.....	39
3.4.2.3.	Analyse des systèmes bouclés .....	40
3.4.3.	Normes matricielles.....	42
3.4.3.1.	Valeurs singulières (ou gains principaux).....	43
3.4.3.2.	Nombre de conditionnement d'une matrice.....	43
3.4.3.3.	Représentation des incertitudes.....	44
3.4.3.4.	Les spécifications sur la stabilité et sur les performances .....	46
a)	Spécification sur la stabilité .....	47
b)	Spécification sur les performances.....	47
3.5.	Application des différentes stratégies de commande .....	48
3.5.1.	La méthode des gains principaux .....	48
3.5.1.1.	Commande robuste mono-variable pour un canal d'irrigation.....	49
a)	Condition de robustesse sur la stabilité .....	50
b)	Conditions de robustesse sur les Performances.....	51
3.5.1.2.	Commande robuste multi-variable pour un canal d'irrigation.....	52
3.5.2.	Commande par la méthode du prédicteur de Smith Filtré.....	53
3.5.2.1.	Le principe de la méthode du prédicteur de Smith .....	53
3.5.2.2.	Le prédicteur de Smith et ses propriétés .....	54
3.5.2.3.	Compensation de temps mort par le Prédicteur de Smith Filtré .....	56
CHAPITRE IV :	Application, Résultats et Discussions .....	59
4.1.	Commande du canal principal impérial d'Aragon (AIMC).....	60
4.1.1.	La commande robuste par méthode des gains principaux.....	60
4.1.1.1.	Les résultats dans le domaine fréquentiel .....	63
4.1.1.2.	Résultats dans le domaine temporel.....	64
4.1.2.	Commande par Prédicteur de Smith filtré.....	66
4.1.2.1.	Discussion des résultats obtenus .....	67
4.1.2.2.	Réponses dans le domaine fréquentiel .....	73
4.2.	Commande du prototype de canal d'irrigation l'institut IMTA :.....	74
4.2.1.	Modèles Proposés .....	75
▪	Condition de robustesse sur la stabilité et les performances.....	80
4.2.2.	Conception du contrôle robuste.....	81
4.2.3.	Application .....	82
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	.....	<b>88</b>

## ***INTRODUCTION GENERALE***

L'eau est une ressource précieuse et essentielle pour la vie, le besoin en eau douce augmente et sa distribution est inégale tant dans l'espace que dans le temps. La gestion de cette ressource a depuis toujours été l'objet de l'attention de l'homme, et est devenue de plus en plus exigeante et délicate du fait de la compétition croissante existant entre ses différents utilisateurs : agriculture, industrie, besoins domestiques, et environnement. Bien que renouvelable, elle existe en quantités limitées, avec de fortes hétérogénéités dans l'espace et dans le temps. Les modes de gestion de l'eau sont donc amenés à se moderniser pour économiser et utiliser « au mieux » la ressource existante ; l'utilisation de technique de l'automatique apparaît comme une des solutions évidentes qui permettrait de se rapprocher d'une gestion optimale.

L'irrigation représente plus de 80 % de la consommation en eau dans le monde constituant sans doute l'usage le plus important de l'eau. Elle est principalement utilisée pour aider à la croissance des cultures agricoles pendant les périodes de précipitations insuffisantes et consiste à apporter de l'eau à des cultures pour permettre leur développement normal dans le but d'améliorer la productivité des parcelles ou de combler un manque d'eau. Les rendements des cultures irriguées sont environ 2,7 fois supérieurs à ceux de l'agriculture pluviale.

Les canaux d'irrigation ont permis le développement de l'agriculture, mais aussi l'alimentation en eau pour l'industrie et les ménages, l'acheminement de l'eau d'irrigation, de sa source (un barrage, une rivière) vers ses usagers (parcelles agricoles, stations de pompage...etc), se fait généralement à travers un réseau complexe et étendu de canaux, d'où l'objectif principal des systèmes d'irrigation est de fournir la quantité d'eau demandée aux différents utilisateurs à des moments précis et de garantir la sécurité des infrastructures.

Un système d'irrigation est un système à retards dynamique dont l'évolution dépend non seulement de son état présent, mais aussi de son état passé, le retard peut limiter et réduire les performances des systèmes commandés et conduire, parfois, le système vers l'instabilité.

L'objectif principal de la gestion des systèmes d'irrigation est de satisfaire la demande en eau des différents usagers avec un minimum de pertes et à moindre coût, le fonctionnement du système de canaux dépend des structures de contrôle, de la profondeur et de la gestion des débits, un système de canal d'irrigation est divisé en des biefs et des portes qui sont généralement les limites entre les biefs d'un canal.

Le contrôle automatique est l'un des moyens d'améliorer l'efficacité de l'irrigation, les canaux d'irrigation sont des systèmes hydrauliques à surface libre équipés de nombreux ouvrages de régulation (manuels historiquement ou automatiques plus récemment) qui en font des systèmes sur lesquels on peut agir. Ils sont caractérisés par des temps de retard élevés, des comportements fortement non-linéaires, des perturbations inconnues fortes et des interactions entre sous-systèmes importantes. Ces canaux sont constitués d'un ensemble de sections appelées biefs, séparés par divers types d'ouvrages mobiles : seuils, vannes, pompes, afin de distribuer l'eau à divers usagers agricoles, mais aussi souvent urbains et industriels. Du point de vue hydraulique, chaque bief a une réponse unique lorsque le débit à travers les structures est modifié. Ces ouvrages ont pour objectif d'assurer la communication entre les différentes sections d'un système hydraulique ou, encore, entre le système et d'autres éléments du réseau de distribution d'eau auquel il appartient. Ces systèmes sont particulièrement intéressants car leurs dynamiques sont complexes : non-linéarités, grande dimension, multi-variables (nombreuses mesures et nombreux points d'action possibles) et temps de retard. Le retard, qui est un phénomène typique dans les processus réels, est causé par la distance entre les ressources en eau et les utilisateurs.

En hydraulique, les écoulements dans les canaux à surface libre sont généralement décrits par les équations de Saint-Venant qui sont des équations aux dérivées partielles hyperboliques du premier ordre non-linéaires.

L'automatique est un domaine procurant de nombreuses méthodologies et d'outils pour analyser ces systèmes et pour proposer des algorithmes de régulation automatique. Les critères souvent étudiés pour ces algorithmes sont la stabilité, la performance et la robustesse. Le principe de l'automatisation d'un canal d'irrigation est d'installer des ouvrages le long de ce canal, à des endroits stratégiques. Le choix de ces endroits est déterminé par des considérations techniques (courbes de remous, alimentation des prises, temps de retards).

La commande automatique d'un canal consiste à agir sur l'ouverture et la fermeture des vannes suivant les données issues des différents instruments de mesures placés sur le canal. Pour économiser et utiliser au mieux la ressource existante, les modes de gestion de l'eau sont amenés à se moderniser ; l'automatisation des canaux est donc devenue un domaine de recherche important.

Les approches de l'automatique ne sont pourtant pas transposables directement aux systèmes hydrauliques à surface libre qui sont des systèmes distribués non linéaires fortement perturbés. Toutefois, il est bien connu que les avantages fondamentaux du contrôle automatique de la distribution de l'eau des principaux canaux d'irrigation sont les suivants :

améliorer l'efficacité et la distribution de l'eau, réduire les pertes d'eau et approvisionnement des usagers en temps utile.

Il existe de nombreuses solutions techniques, suivant les choix des variables manipulées (contrôlées, mesurées, de contrôle), suivant la logique de contrôle (boucle ouverte ou boucle fermée, commande par l'amont ou par l'aval, ou mixte), les algorithmes utilisés (pour le modèle et le contrôleur) et l'implémentation logicielle et matérielle (architecture localisée, hiérarchisée ou centralisée, seuils ou vannes, vannes hydromécaniques ou motorisées, etc.). Ces choix ne sont pas neutres et ont des conséquences très importantes sur les contraintes, la complexité et sur les performances globales des canaux ainsi automatisés.

Concevoir une stratégie de contrôle débouchant sur un contrôleur pratique est une tâche difficile, car les canaux d'irrigation sont des systèmes complexes répartis sur de longues distances, avec des retards importants (entre les ressources en eau situées en amont et les utilisateurs situés en aval) et une dynamique qui varie avec les conditions de fonctionnement. Les expériences développées par certains auteurs confirment que les paramètres des principaux canaux d'irrigation varient considérablement dans la plage de fonctionnement ( $Q_{min}, Q_{max}$ ) et que d'autres paramètres hydrauliques changent avec le temps. Cette classe de principaux canaux d'irrigation est connue sous le nom de canaux avec des paramètres dynamiques variant dans le temps, et tout contrôleur conçu pour cette classe de principaux canaux d'irrigation doit donc être robuste aux variations de paramètres.

Plusieurs stratégies de contrôle des principaux canaux d'irrigation ont été proposées, dont les plus populaires et les plus répandues sont basées sur les contrôleurs PID classiques. Cependant, de nombreuses études ont montré que les contrôleurs PID simples ne fonctionnent pas bien lorsque les principaux canaux d'irrigation se caractérisent par un comportement dynamique difficile. Le calage des coefficients peut être délicat du fait des temps de retard importants, des interactions entre les divers biefs d'un réseau de grande dimension et par le caractère non linéaire de leur fonctionnement hydraulique.

Les travaux que nous avons menés dans cette thèse ont eu pour but de développer une commande pour les systèmes d'irrigation, nous nous intéressons plus spécifiquement à la gestion hydraulique des systèmes irrigués qui consiste à fournir de l'eau en un point donné en quantité et en temps voulu par l'utilisateur, nous montrerons plusieurs méthodes simples à mettre en œuvre, adaptée aux dynamiques hydrauliques. Il existe également des méthodes plus sophistiquées particulièrement bien adaptées aux systèmes multi-variables, capables de calculer simultanément les commandes à appliquer pour satisfaire des objectifs sur un

ensemble de points répartis sur le système. Des méthodes systématiques de conception de contrôleurs efficaces et robustes pour les principaux canaux d'irrigation sont donc souhaitables, leur développement est un problème crucial dans le but d'améliorer la gestion et la distribution de l'eau dans les principaux canaux d'irrigation, et ils ont fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques.

Ces méthodes sont généralement basées sur un modèle nominal, tandis que les paramètres dynamiques des principaux canaux d'irrigation varient avec le changement des conditions hydrauliques. L'utilisation d'un bon modèle de processus à contrôler est indispensable pour presque toutes les techniques de contrôle existantes. Le développement d'une stratégie de commande passe par trois étapes : l'identification d'un ou de plusieurs modèles, sa validation et la synthèse de la loi de commande puis la validation de la loi de commande et notamment l'analyse de sa robustesse.

Le défi majeur de notre travail de recherche est de concevoir une loi de commande, qui assure le rejet de perturbations, la stabilité, et la robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques. L'objectif principal de la structure est d'élaborer une commande prenant en compte des objectifs précis de performances et des contraintes de robustesse. C'est à dire assurer la stabilité de la boucle fermée ainsi qu'un certain degré de performance, mais aussi de réduire la sensibilité de la structure de commande en présence des variations paramétriques et d'éventuelles perturbations affectant le modèle du système à commander.

### **Organisation de la thèse**

La structure de cette thèse est présentée en quatre chapitres, précédés par une introduction générale :

- En effet nous présentons dans un premier temps, dans le chapitre I, un état de l'art sur le contrôle automatique des canaux d'irrigation à travers une revue de la littérature disponible. Nous évoquons les différentes méthodes de contrôle utilisées dans le domaine, puis, nous abordons plus spécifiquement les différentes stratégies de commande que nous allons utiliser.
- Le deuxième chapitre, est consacré à la présentation ainsi que la modélisation des biefs de canaux d'irrigation notamment ceux utilisé dans notre travail. Ensuite, dans le troisième chapitre nous définissons les différentes lois de commande et les différentes méthodes utilisées, avec deux types de canaux à surface libre différents. On abordera

la question de la stabilité, la robustesse et les conditions de robustesse ainsi que leurs effets sur les performances.

- Le dernier chapitre est consacré à l'interprétation et la discussion des résultats obtenus lors des différentes simulations réalisées et la comparaison de toutes les méthodes proposées pour validation.

Enfin, nous achèverons ce travail de thèse par une conclusion générale où nous présenterons, par la suite, les perspectives possibles qui permettraient d'ouvrir la porte à des solutions plus pertinentes.

## ***CHAPITRE I : Etat de l'art***

---

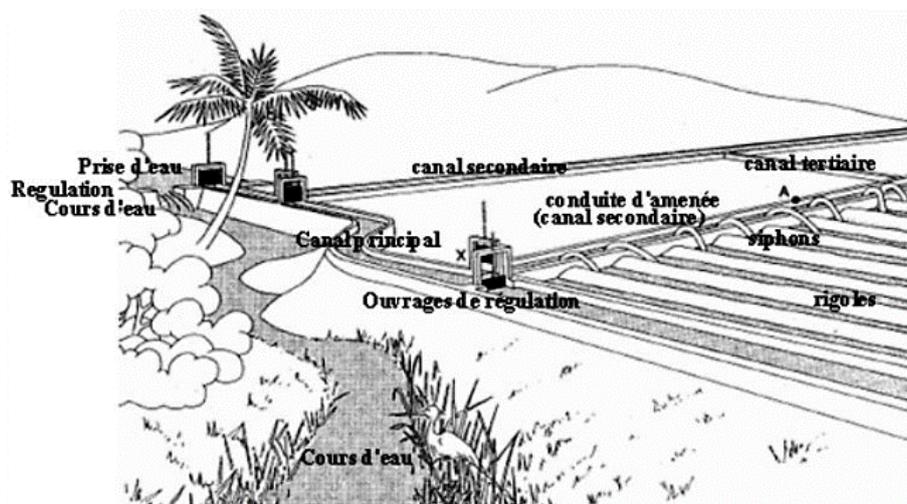
Ce chapitre montre les principales méthodologies utilisées dans le développement et la conception de contrôleurs pour des systèmes de type canal d'irrigation. Ces systèmes sont caractérisés par des temps de retards, des comportements non-linéaires, des perturbations inconnues fortes et des interactions entre sous-systèmes. Bien qu'une grande partie de ces travaux soit toujours à l'étape de recherche, de plus en plus de ces techniques ont des mises en œuvre sur le terrain couronnées de succès.

## 1.1 Historique

L'irrigation a été pratiquée dans toutes les régions du monde où il a fallu remédier à la sécheresse provoquée par des précipitations faibles ou irrégulières. En réponse aux contraintes climatiques l'Homme a élaboré depuis des millénaires des méthodes pour arroser leurs cultures en créant des systèmes d'irrigation parfois complexes.

L'agriculture irriguée contribue pour plus d'un tiers à l'alimentation de la population mondiale et continuera nécessairement à jouer un rôle déterminant au siècle prochain. Bien que la surface totale irriguée dans le monde soit en augmentation, la surface irriguée par habitant est en diminution en raison de la croissance rapide de la population. De nombreux projets d'irrigation réalisés dans le passé n'irriguent plus leurs périmètres de la façon prévue à l'origine. Les coûts de réalisation de nouveaux aménagements d'irrigation sont de plus en plus élevés. Il devient ainsi indispensable d'augmenter la productivité à la fois par unité de surface de terrain et par unité de volume d'eau. La réhabilitation, la modernisation et l'automatisation sont considérées comme l'une des options permettant d'atteindre le double objectif ci-dessus. Ces stratégies ont été et sont toujours mises en œuvre dans de nombreux projets d'irrigation partout dans le monde.

Un système d'irrigation est doté d'ouvrages permettant de maintenir et de contrôler les débits et réguler les niveaux d'eau dans les canalisations dans les cours d'eau de prélèvement,



*Figure 1. 1. Présentation simplifiée d'un système d'irrigation*

Pour une gestion rationnelle d'une agriculture, l'eau est prise d'une source d'eau, est véhiculée par des conduites formant un réseau de canalisations, puis délivrée en quantités prescrites vers les champs des agriculteurs. Les volumes d'eaux fournis doivent satisfaire autant que possible

les besoins en eau des cultures sans excès ni manque et garantir une récolte productive et rentable. Un tel pari ne peut être gagné que si on maîtrise l'écoulement de l'eau dans les canalisations du système et à l'intérieur même des parcelles. Ceci est rendu possible grâce aux techniques de régulation et d'automatisation des niveaux d'écoulement, de contrôle des débits et de partition des quantités d'eau dans différentes conduites. Dans ce cadre, les systèmes d'irrigation sont équipés d'ouvrages et de constructions hydrotechniques, ce qui permet d'optimiser leur fonctionnement et par conséquent éviter le gaspillage d'eau et rentabiliser les récoltes.

## 1.2 Modernisation des canaux d'irrigation

De nombreux réseaux d'irrigation souffrent d'une mauvaise utilisation de la ressource en eau. Les hydrauliciens ont donc pris la décision d'améliorer et de rationaliser l'utilisation de cette ressource par la mise en œuvre d'un programme de modernisation et d'automatisation de ces réseaux. (M Bolze et al, 1993)

Les canaux d'irrigation sont équipés d'ouvrages hydrauliques (vannes, seuils) qu'il convient de gérer de manière manuelle ou automatique afin de garantir des niveaux, des débits et/ou des volumes en certains points importants. Les objectifs de cette gestion sont par exemple d'éviter les débordements, de garantir une alimentation correcte des prises d'eau et d'économiser l'eau.



*Figure 1. 2. Photo d'un canal d'irrigation*

La plupart des systèmes de distributions traditionnels ne sont pas ou peu flexibles. Leurs stratégies et structures de contrôle sont inadaptées aux bonnes pratiques de la gestion de l'eau. La distribution d'eau au niveau des exploitations n'est pas compatible avec les exigences essentielles de l'agriculture moderne.

L'automatisation des canaux pour les systèmes d'irrigation se concentre sur les aspects techniques de la modernisation des systèmes d'irrigation par l'utilisation de systèmes de contrôle automatisé des canaux.

Le domaine de l'automatisation des canaux est très riche pour la recherche de l'automaticien, les méthodes classiques et modernes de l'Automatique trouvent de nombreuses applications dans ces systèmes ; l'objectif idéalisé de l'automatisation d'un canal d'irrigation est de permettre le fonctionnement du canal, sans l'intervention manuelle de l'homme, et cela pour toutes les conditions de fonctionnement possibles du canal, et en présence de toutes les perturbations imaginables. (Jean-François, 2001)

Une meilleure gestion d'eau et les investissements efficaces dans la modernisation des canaux d'irrigation sont des mesures essentielles dans de nombreux pays pour satisfaire la demande croissante en eau. Le contrôle automatique des principaux canaux est essentiel pour augmenter l'efficacité et la flexibilité des systèmes d'irrigation. (D Lozano et al., 2010)

Les avantages de l'automatisation des systèmes d'irrigation sont nombreux (Malaterre P.-o. , La gestion des canaux et des rivières, 1994):

- économie d'eau avec une utilisation optimale de l'eau disponible, dans un contexte de compétitivité de plus en plus forte entre usagers ;
- diminution de la main d'œuvre vers une distribution à la demande ; plus grande sécurité des ouvrages, avec la capacité de détecter des anomalies et de réagir rapidement ;
- économie sur les coûts d'investissement ;
- économie sur les coûts de fonctionnement (personnel).

### **1.3 Etat de l'art**

De nombreuses stratégies de commande ont été étudiées et testées, des méthodes heuristiques mono variables ont été développées à partir de considérations hydrauliques. Ces différentes stratégies changent d'un pays à un autre, d'une région à une autre ou d'un site à un autre ; Elles vont des plus sommaires, développées il y a plus de 2000 ans, aux plus sophistiquées mises au point récemment, ou en cours de développement, à partir des techniques modernes de l'automatique, une littérature importante existe sur ce sujet.

Les chercheurs en automatique multiplient les recherches et les innovations dans le domaine de l'automatisation des canaux d'irrigation à surface libre, différents modèles

mathématiques des principaux canaux d'irrigation ont été proposés dans la littérature. Chaque auteur a utilisé son propre modèle de simulation, avec quelques différences. Des hydrauliciens et des automaticiens ont adapté ou développé de nombreuses méthodes de contrôle mono-variables et multi-variables pour les systèmes de type canal d'irrigation ou rivière. Toutes ont été développées et évaluées sur des modèles de simulation. (Pierre-Oliver, 2003)

Il existe de nombreux types de commandes susceptibles de piloter de tels systèmes, les plus récentes font appel en générale à des techniques multi-variables. La plupart sont encore au stade de la recherche, mais on commence à trouver sur le terrain des mises en œuvre aux résultats prometteurs.

Les canaux d'irrigation sont des systèmes physiques complexes, de grande taille, non linéaires, présentant des retards importants et des variables et sont également sujets à toutes sortes de perturbations. Toutes ces considérations aiguissent l'intérêt de nombreux chercheurs, donnant lieu à diverses techniques de contrôle automatique pour la maîtrise de ces systèmes.

La modernisation des canaux, l'automatisation des ouvrages et l'instrumentation, permettent de modifier la gestion traditionnelle des canaux d'irrigation et de faire face à ces nouveaux enjeux. Les auteurs dans (Pierre-Olivier MALATERRE et al, 2013) s'intéressent plus particulièrement aux apports de l'automatisation pour les économies d'eau et l'amélioration de la qualité de distribution et présente différentes approches possibles pour automatiser un canal.

Des avancées importantes ont été faites pour améliorer la performance des contrôleurs mono-variables et pour réduire les efforts informatiques des contrôleurs multi-variables en tenant compte de défauts possibles sur les ouvrages. Si les effets non-linéaires sont les difficultés principales de contrôle, une approche non-linéaire directe peut aussi être utilisée et elle peut être intéressante. (Coron J M et al, 1999)

Certaines études ont été menées pour comparer les performances de certains algorithmes de contrôle appliqués aux canaux d'irrigation. (Clemmens, 1989)

Il existe une variété de systèmes de contrôle pour les réseaux à canaux ouverts. On peut en trouver dans (Malaterre, 1994) une classification détaillée.

Le type de contrôle et le type de structure nécessaires à chaque bief du canal doivent être soigneusement examinés et adaptés au type de système de livraison et aux contraintes opérationnelles.

La plupart des méthodes de contrôle développées et testées sur les canaux d'irrigation sont basées sur la théorie du contrôle utilisent le contrôleur très populaire en industrie, le PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) mono-variable en boucle fermée, et il existe de nos jours un grand nombre de recherches et une littérature abondante sur les contrôleurs PID. La détermination de l'ensemble de contrôleurs PID qui stabilisent un système quelconque sans retard est un premier pas dans la réduction de l'écart entre la pratique et la théorie de la commande.

La compréhension simple, la facilité d'utilisation et les performances robustes sont les raisons les plus importantes d'utiliser ces contrôleurs dans la pratique ; le contrôle PID est une stratégie de contrôle en boucle fermée largement utilisée dans le contrôle industriel, y compris les processus hydrauliques. En approche PID, la variable de contrôle est obtenue à la base de l'erreur mesurée qui est la différence entre la variable contrôlée et le point de consigne souhaité. Bien que très performantes dans la plupart des cas, ces méthodes présentent l'inconvénient de ne pas prendre en compte explicitement les temps de retard caractéristiques des biefs de canaux. Un long retard ajoute un grand retard de phase au système, ce qui déstabilise le système de contrôle en boucle fermée,

Quelques exemples de contrôle PID mis en œuvre sur les canaux d'irrigation peuvent être trouvés dans la littérature. Dans (Litrico X and Georges D, 1999) les chercheurs implémentent un contrôleur PID pour un système barrage-rivière et les résultats de la simulation ont indiqué que le contrôleur réagit rapidement aux perturbations imprévues, mais avec des oscillations. Une panoplie de méthodes de contrôle des plus courantes, basé sur l'utilisation de la proportionnelle / dérivée / intégrale de l'erreur mesurée pour corriger l'action de contrôle dans une boucle fermée est utilisée (Ratinho et al, 2002) et (Rijo M, 2003), (Litrico X and Fromion V , 2004a) (Litrico X and Fromion V , 2004b), (Litrico X and Fromion V, 2006a), (Litrico X and Fromion V , 2006b) et (Litrico X et Al, 2008).

Un contrôle du niveau d'eau proportionnel-intégral (PI) en amont est développé et testé expérimentalement dans un canal prototype (Litrico X et Al, 2007). Les paramètres du contrôleur PI en utilisant la réponse en fréquence de chaque bief où l'utilisation de la marge de gain obtenue pour différentes conditions de décharge a permis d'avoir des contrôleurs robustes.

Dans le contrôle des canaux d'irrigation, et en particulier dans le contrôle du niveau d'eau en aval, le retard a des valeurs très élevées. Ce délai fait que l'effet positif de l'action

dérivée sur les marges de phase et de gain est minime, et par conséquent, l'action dérivée n'est généralement pas mise en œuvre (Aguilar J et Al, 2009) (Aguilar J V et Al, 2012)

Des techniques de contrôle robuste peuvent paraître intéressantes car les non-linéarités des systèmes induisent des erreurs sur les modèles et les perturbations inconnues peuvent être importantes. Elles ont été évaluées par plusieurs auteurs, notamment (Litrico X and Georges D , 1999)

Au cours des trois dernières décennies, d'importants efforts de recherche et développement ont été rapportés dans la littérature concernant la conception de contrôleurs automatiques pour les canaux d'irrigation. L'état de l'art de l'automatisation des canaux est résumé dans plusieurs ouvrages tels que (Malaterre P O and Baume J P, 1998) (Rogers D and Goussard J, 1998) (Mareels I et Al, 2005) (Sepulveda, 2008) et (Horvath K et Al, 2012) (Horvath K et Al, 2013a).

Pour surmonter le problème des retards induits dans les canaux à surface libre, le prédicteur de Smith a été appliqué par plusieurs chercheurs par la combinaison de contrôleurs PI. Les performances et la robustesse du contrôleur par prédicteur de Smith ont été testées pour des processus du premier et du second ordre avec un retard temporel et même comparés aux contrôles PI et PID (Axel Lødemel Holene, 2013).

Une structure modifiée avec un prédicteur filtré pour contrôler un processus à temps mort variable est proposée dans (Normey-Rico J E & Camacho E F, 1998).

Aussi, des schémas de conception de contrôleurs d'ordre fractionnaire basés sur un prédicteur de Smith modifié pour des systèmes d'ordre entier ou fractionnaire avec un long délai sont proposés (Bettayeb, 2017) (TNL Vu, M Lee, 2014) (Hemayathy P R et al, 2019).

Deux exemples de stratégies de contrôle appliquées aux canaux d'irrigation en cas de changement important des conditions d'exploitation peuvent être trouvés dans (Charbonnaud P et al, 2011) Dans (Duviella E et al, 2010). Des contrôleurs de programmation de gain basés sur un modèle ont été proposés pour les systèmes de canaux afin de faire face à de grandes conditions de fonctionnement, elles ont été évaluées par plusieurs auteurs, notamment (Litrico X et Al, 2007).

Depuis le début des années 1980, les développements théoriques récents se tournent à nouveau vers les problèmes liés à la robustesse des lois de commandes. (Doyle J C and Stein G, 1981) posent les bases fondamentales d'une théorie exigeant d'une commande une robustesse aux incertitudes de modélisation et précisent les compromis entre de bonnes performances et une excellente robustesse.

Des approches par contrôle robuste ont été testées par plusieurs auteurs (X. Litrico et Al, 2000) (Litrico X. , 1999), elles sont intéressantes de par le fait que les systèmes de canaux sont fréquemment soumis à de très fortes perturbations, et que les modèles utilisés génèrent aussi des erreurs liées notamment à la non-linéarité.

D'autres contrôleurs linéaires ont été utilisés sur des rivières réalimentées par des barrages, avec des temps de retard importants. Des approches de contrôle robuste sont intéressantes et ont été évaluées par plusieurs auteurs à cause de certaines caractéristiques importantes des systèmes comme les perturbations inconnues fortes et les erreurs de modèle en raison des effets non-linéaires (Schuurmans J, 1997) (Litrico X and Georges D , 1999)

Notant que plusieurs autres méthodes sophistiquées ont été évaluées mais n'ont jamais été testées sur des benchmarks et il est donc difficile de savoir si elles conduisent à des performances qui justifient leur complexité.

Il est à noter que, au cours des vingt dernières années, la communauté des chercheurs s'est concentrée sur les méthodes de contrôle pour améliorer la gestion opérationnelle des systèmes d'adduction d'eau. Cependant, l'opération de fermeture automatique du canal a reçu beaucoup moins d'attention dans la littérature sur les canaux d'irrigation.

Les méthodes mono-variables présentent l'inconvénient de nécessiter un découpage du système en sous-systèmes sans tenir compte explicitement des interactions entre ces sous-systèmes. Or, un canal d'irrigation est typiquement un système multi-variable présentant de fortes interactions entre sous-systèmes (la manœuvre d'une vanne a des influences sur plusieurs biefs amont et aval). La technique du découplage a pour objectif de limiter, dans la mesure du possible, l'influence d'une commande sur la seule sortie contrôlée par le régulateur. Le processus global multi-variable peut alors être considéré comme une série de processus indépendants mono-variables non interactifs évoluant en parallèle. Ceci est possible si le nombre d'entrées est supérieur ou égal au nombre de sorties, plusieurs automaticiens utilisent des méthodes multi-variables basées sur des placements de pôle dans l'espace d'état, ou sur des PID multi-variables.

Lorsqu'une régulation doit être mise en place sur un réseau à surface libre, l'étude est généralement menée par des hydrauliciens et non pas par des automaticiens. La commande multi-variable qui sera étudiée ici devra être suffisamment simple pour pouvoir par la suite être implémentée par quelqu'un qui n'est pas familier avec les techniques pointues de l'automatique.

Puisque certaines caractéristiques importantes des systèmes considérés sont les perturbations inconnues fortes et les erreurs de modèle en partie en raison des effets non-linéaires, des approches de contrôle robuste sont intéressantes et ont été évaluées par plusieurs auteurs. Ces méthodes sont encore à l'état de recherche

Donc, toutes ces considérations ne feront qu'aiguiser l'appétit des chercheurs pour trouver des solutions pertinentes et efficaces à ce sujet aussi passionnant que stimulant.

## *CHAPITRE II : Description et Modélisation d'un Canal*

---

Le développement d'un système de commande passe par plusieurs étapes importantes, à commencer par la description du système ou la compréhension de son fonctionnement en général, en étudiant tous ses composants. La deuxième étape est la modélisation du système sous une forme simple mais suffisamment précise, la troisième est l'analyse, ou étude du comportement du modèle, et enfin le contrôle ou la détermination d'une commande conduisant à une dynamique prédéfinie du système étudié.

Dans ce chapitre, on présente des généralités sur les systèmes d'irrigation, leurs caractéristiques ainsi des notions de base de la modélisation de ces systèmes ainsi les différents modèles utilisées dans notre thèse.

### 2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de décrire les systèmes de distribution d'eau et plus particulièrement les canaux d'irrigation à surface libre, ces systèmes font l'objet d'un nombre croissant de travaux visant à développer diverses stratégies de contrôle automatique visant le contrôle et de la gestion des ressources en eau qui est un outil indispensable pour éviter les pertes et gaspillages générés par les systèmes traditionnels.

Un grand nombre des méthodes utilisées recourent à un modèle plus ou moins complexe de la dynamique de l'écoulement, modèle généralement basé sur les équations de Saint-Venant. La description des systèmes de canaux d'irrigation à surface libre recouvre un grand nombre de domaines : la structure des canaux, les lois régissant les écoulements, la description des ouvrages d'interconnexion de bief, ainsi que quelques éléments des problématiques de contrôle automatique constituant l'axe majeur des travaux de recherches concernant les canaux d'irrigation.

On distingue deux grandes classes de modèles :

- **Les modèles de connaissance** : basés sur les lois de la physique
- **Les modèles de représentation** : basés sur des représentations mathématiques de type boîte noire.

Les premiers modèles sont le plus souvent obtenus via les équations de Saint-Venant. Les modèles du second type, appelés aussi modèle de conduite, sont obtenus expérimentalement par identification. C'est ce dernier type de modèles qu'on utilise dans cette thèse.

Pour effectuer la synthèse du contrôleur, tout d'abord il faut disposer d'un modèle qui représente le système à un point de fonctionnement donné. Ce modèle devra dépendre, dans la mesure du possible, des paramètres physiques en fonction de l'état du système lorsqu'il fonctionne dans des conditions données. D'autre part, il est nécessaire de disposer d'un modèle suffisamment fiable pour tester le contrôleur. (VIAL, 2004)

On désigne par les modèles considérés toute formulation mathématique pour la description des dynamiques des systèmes multi-variables. Le procédé possède un modèle, soit par une représentation temporelle ou par une représentation fréquentielle.

## 2.2 Représentation générale d'un système à contrôler

On représente le système à contrôler sous la forme de la figure 2.1, où  $U$  représente l'ensemble des variables d'action sur le système, c'est-à-dire les variables dont l'opérateur peut fixer la valeur à son gré afin d'appliquer une commande au système. Tandis que  $Y$  représente l'ensemble des variables contrôlées du système, celles auxquelles on souhaite imposer une valeur ou un intervalle de valeurs par le biais d'une consigne, mais que l'on ne peut manipuler qu'indirectement via la commande  $U$  et la réponse du système à cette commande (Marcou, 2010).

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

1. Les variables contrôlées ;
2. Les variables mesurées ;
3. Les variables d'action.

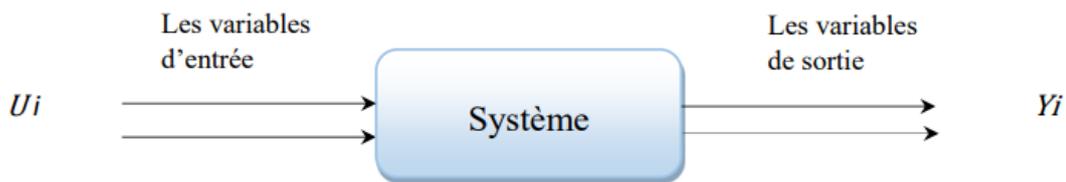


Figure 2. 1. Représentation schématique d'un système soumis à un processus de contrôle

Où :

$U_i$  Sont les variables de contrôle du système, sur lesquelles on peut agir, afin de modifier l'état du système,

$Y_i$  Sont les variables contrôlées du système, auxquelles on peut assigner des consignes (constantes ou variables).

Les caractéristiques du système hydraulique à surface libre tel que le bief d'un canal d'irrigation dépendent de sa conception particulière et des conditions de fonctionnement du débit d'eau.

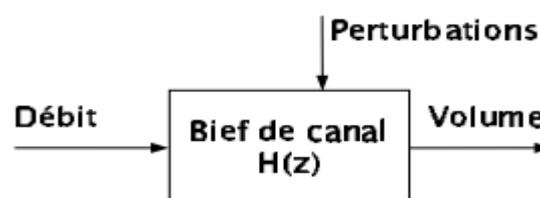


Figure 2. 2. Procédé à commander

Les écoulements dans les canaux naturels et artificiels sont des écoulements à surface libre. Ce mouvement d'eau est dû à la gravité grâce à la pente qui favorise l'écoulement, comme pour les conduites, à la différence de charge entre deux sections. (Nebbar, 2018).

### 2.3 Description des canaux d'irrigation à surface libre

Un canal d'irrigation (figure 2.3) est un système hydraulique à surface libre, dont l'objectif principal est de transmettre de l'eau de sa source amont (ex : barrage, rivière) à ses usagers finaux aval. En fait, c'est tout un réseau de canaux de plus en plus petits qui permettent de la distribuer aux différents utilisateurs pour des fins d'irrigation. La section d'un canal peut prendre plusieurs formes : rectangulaire, Trapézoïdale, Triangulaire, circulaire ou parabolique, la figure suivante montre les différentes sections de canaux.

Les différents régimes d'écoulement, généralement rencontrés dans un canal sont du type uniforme ou non uniforme graduel (ou rapide) comme le montre la figure 2.5.

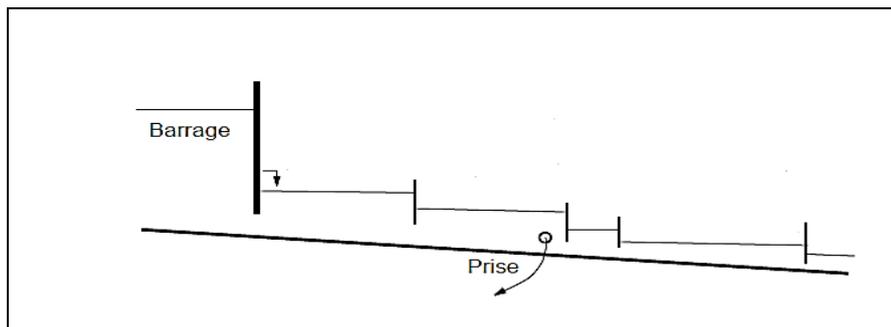


Figure 2.3. Canal d'irrigation

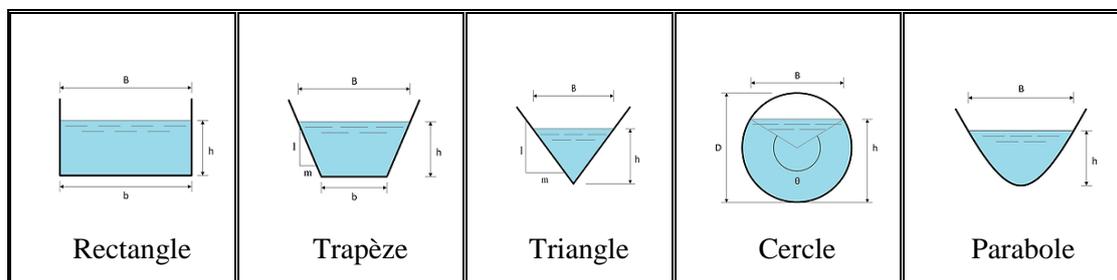
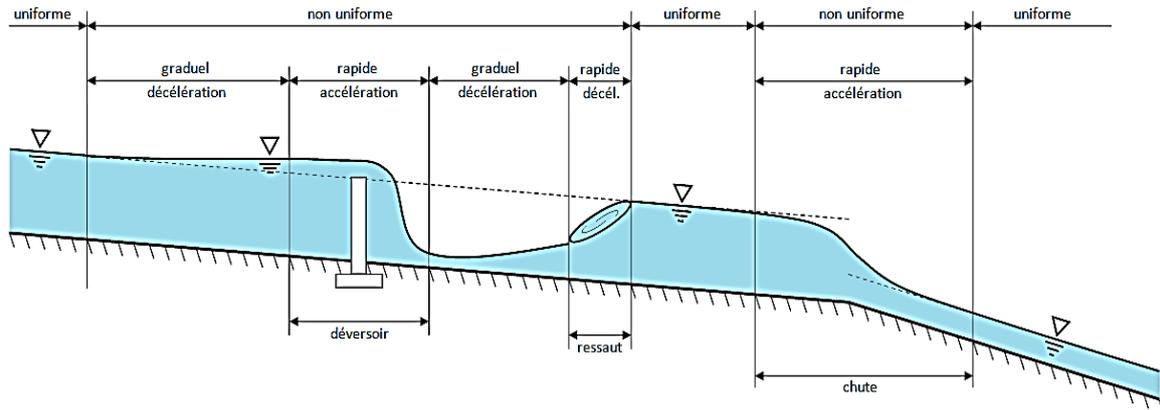


Figure 2.5. Différents sections de canaux

Ces systèmes distribués présentent une dynamique incluant des temps de retard importants et de forte non linéarités. Des structures en travers (principalement des vannes) sont

manœuvres pour contrôler les niveaux d'eau, des débits ou des volumes le long du canal. (Malaterre P. O., 2003)

Les portes de contrôle ou les vannes sont la principale structure de contrôle d'un canal d'irrigation. Elles sont principalement utilisées pour réguler les niveaux d'eau, pour mesurer et contrôler le débit, et pour augmenter et réguler les volumes de stockage dans le canal.



*Figure 2. 4. Schéma représentant les différents régimes d'écoulement dans un canal*

Le temps de retard (ou le temps mort) est le pire ennemi du contrôle, car il ajoute un déphasage qui affecte la stabilité de la boucle fermée. Le retard est défini comme étant la propriété d'un système physique pour lequel la réponse à une action appliquée est retardée dans son effet. Ces retards sont souvent négligés, mais lorsque leurs tailles deviennent significatives par rapport aux dynamiques du système (en boucles ouverte et fermée), il n'est plus possible de les ignorer. Pour cela, il est très difficile de commander les systèmes qui possèdent un temps de retard. (Farkh, 2011)

Par ailleurs, même si le procédé lui-même ne contient pas de retards, les capteurs, les actionneurs et les temps de calcul nécessaire à sa commande peuvent engendrer des retards non négligeables. Les systèmes à retards sont des systèmes dont la dynamique dépend non seulement de la valeur de l'état en temps courant  $t$ , mais aussi des valeurs passées de la commande et/ou de l'état prises sur un certain horizon temporel.

Une façon naturelle de diviser un canal est de le diviser en tronçons (également appelés biefs). Un bief est une partie d'un canal entre deux portes de contrôle ou deux ouvrages de régulation. Il est considéré comme étant un système acceptant un débit en entrée, et donnant

en sortie une estimation du volume d'eau présent. Il existe de fortes interactions entre les biefs d'un canal d'irrigation où les portes de contrôle sont la principale structure de contrôle. Les barrières sont principalement utilisées pour réguler les niveaux d'eau, pour mesurer et contrôler le débit, et pour augmenter et réguler les volumes de stockage dans le canal. (Buyalski, 1991)

Ainsi, un canal normal peut avoir plusieurs biefs avec des caractéristiques différentes (longueur, pente, largeur, etc.).

La figure suivante montre un schéma d'un principal canal d'irrigation avec des portes. Dans les canaux à régulation automatique les variables contrôlées sont les niveaux d'eau  $y_i(t)$ , les variables manipulées sont les positions des portes  $u_i(t)$ , et  $q_i(t)$  sont les variables de perturbation (prise d'eau).

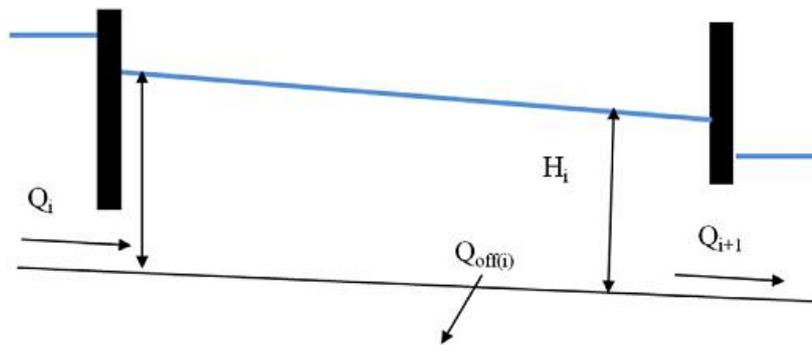


Figure 2.5. Représentation simplifiée d'un bief

Dans la figure 2.7,  $Q_i(t)$  est la décharge à travers la section transversale du canal.

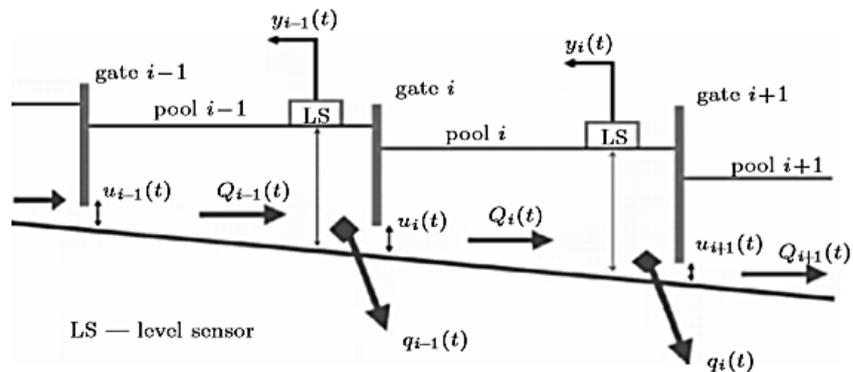
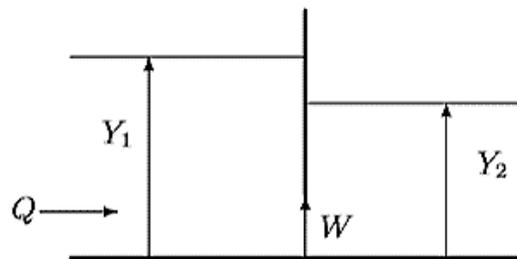


Figure 2.6. Deux biefs d'un canal d'irrigation avec portes coulissantes

Si les niveaux d'eau sont mesurés près de la fin du bief, le système de contrôle est appelé contrôle en aval à distance, le contrôle en aval est considéré comme supérieur au contrôle en amont (niveau d'eau mesuré immédiatement après la porte de contrôle) car il augmente l'efficacité de l'utilisation de l'eau et améliore la fiabilité et la flexibilité du système. Aussi, il n'est pas nécessaire de connaître les variations du niveau d'eau le long du bief pour contrôler le niveau d'eau dans les canaux. Il suffit de le mesurer à certains points spécifiques dépendant du type de contrôle de canal utilisé sachant que la longueur du bief est également une variable importante car le retard augmente avec la longueur.

Les considérations précédentes permettent de rapprocher la dynamique du principal canal d'irrigation au moyen de modèles linéaires à paramètres concentrés et avec un délai temporel à des fins de contrôle. (Monje C A et al, 2010)

Le choix de la régulation d'un canal d'irrigation se fait d'une façon simple il s'agit de réguler certaines variables contrôlées « Z » à partir de certaines variables de commande « U » en présence de perturbations « W » et à l'aide de mesures « Y ». Pour faire cela il faut un modèle de la dynamique reliant les « U » et les « Z » (et éventuellement les « W » et les « Y »)



*Figure 2.7. Représentation schématique de deux biefs séparés par une vanne*

Où  $Q$  est le débit de la vanne,  $Y_1$  le niveau amont de la vanne (qui correspond au niveau aval du bief 1),  $Y_2$  le niveau aval de la vanne (qui correspond au niveau amont du bief 2), et  $W$  l'ouverture de la vanne.

### 2.4. Modèle de Barré Saint-Venant

La dynamique physique des systèmes hydrauliques à surface libre tels que les canaux d'irrigation peut être correctement approchée par les équations de Saint-Venant qui sont des équations hyperboliques aux dérivées partielles non-linéaires (modèle distribué), combinées avec des équations d'ouvrages en travers algébriques non linéaires. Chacune de ces équations formalise une loi de conservation particulière à la mécanique des fluides (Litrice X. , 1999) : l'une exprimant la loi de conservation de la masse au sein du bief dont l'équation

correspondante est couramment appelée équation de continuité l'autre exprimant la loi de conservation de la quantité de mouvement à laquelle correspond l'équation dite dynamique. Les paramètres de ces équations différentielles linéaires résultantes changent généralement en fonction du régime d'écoulement opérationnel

Il existe plusieurs formulations possibles des équations de Saint-venant suivant les variables choisies et termes pris en compte, la formulation montrée par la suite sera la formulation en débit.

Les équations sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (a) \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/S}{\partial x} + gS \frac{\partial H}{\partial x} = gS(I - J) \quad (b) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Avec :

- $S(x, t)$  noté  $S$  la section mouillée ( $m^2$ ) à l'instant  $t$
- $Q(x, t)$  noté  $Q$  le débit ( $\frac{m^3}{s}$ ) à travers la section  $S$
- $H(x, t)$  noté  $H$  la hauteur d'eau (m)
- $J(Q, Y, x)$  noté  $J$ ,  $J = n^2 Q^2 S^2 R^{\frac{4}{3}}$  est la pente de frottement ( $n$  est le coefficient de Manning)
- $R$  rayon hydraulique (m)
- $t$  le temps (s)
- $x$  Variable d'espace dans le sens de l'écoulement (m)
- $g$  l'accélération de la pesanteur ( $\frac{m}{s^2}$ )
- $I$  est la pente de fond du canal [m / m]

Il est à noter que  $S$  dépend explicitement à la fois du niveau de l'eau et de la forme de la section transversale du canal.

Les termes de la deuxième équation (b) correspondent respectivement à :

- $\frac{\partial Q}{\partial t}$  premier terme d'inertie (énergie due à l'accélération dans la direction Ox)
- $\frac{\partial Q^2/S}{\partial x}$  deuxième terme d'inertie (accélération convective)

$gS \frac{\partial H}{\partial x}$	terme de pression lié à la pente de la surface libre
$gSI$	terme de gravité lié à la pente I du fond du canal
$gSJ$	terme de frottement lié aux pertes de charge

Ces équations doivent être complétées par des conditions à la limite externes, par exemple :

$$Q(0, t) = Q_0(t),$$

et  $Q(X, t) = Q_X(t)$  ou  $(X, t) = H_X(t)$

Où  $X$  est la longueur du canal considéré) et internes (aux ouvrages en travers), où les équations de Saint-Venant ne sont pas valides et par des conditions initiales  $Q(x, 0)$  et  $H(x, 0)$  pour  $x \in [0, X]$ . Selon le type d'ouvrage en travers et les conditions hydrauliques, ces équations peuvent avoir des formes différentes (Malaterre P. O., 2003) :

Seuil – Dénoyée : $Q = C_{sd}L\sqrt{2g} h_1^{\frac{3}{2}}$	(a)	
Seuil – Noyée : $Q = C_{sn}L\sqrt{2g}\sqrt{h_1 - h_2}h_2$	(b)	(2.2)
Vanne – Dénoyée : $Q = C_{vd}Lw\sqrt{2g}\sqrt{h_1 - \frac{w}{2}}$	(c)	
Vanne – Noyée : $Q = C_{vn}Lw\sqrt{2g}\sqrt{h_1 - h_2}$	(d)	

Avec :

$L$	largeur de l'ouvrage (m)
$h_1$	cote de l'eau amont (resp. aval) (m) par rapport au radier
(resp. $h_2$ )	
$w$	ouverture de l'ouvrage (m)
$C_*$	coefficients de débit

Ces équations individuelles ne sont pas suffisantes, puisqu'un ouvrage peut, pendant sa manœuvre, changer d'une condition hydraulique à une autre.

Les équations de Saint-Venant n'ont pas de solution analytique connue en géométrie réelle. Dans quelques cas simples (pente nulle, sans frottements, section rectangulaire constante), la méthode des caractéristiques peut fournir une solution analytique exacte. Mais, pour des simulations sur des systèmes réels, ces équations doivent être résolues numériquement. Plusieurs schémas numériques aux différences finies, explicite ou implicite peuvent être utilisés

Les modèles numériques ainsi développés peuvent être plus ou moins sophistiqués, et par exemple résoudre les équations linéaires ou non-linéaires aux ouvrages. Les équations de Saint-Venant peuvent également être résolues avec ou sans prise en compte de leur non-linéarité (itérations à chaque pas de temps de calcul). Certaines conditions d'écoulement peuvent également être prises en compte ou non (écoulements torrentiels, assèchement ou remplissage des biefs, positionnement des ressauts hydrauliques, etc.). (Litrice X. , 1999)

### 2.5. Modèles de conduite

#### 2.5.1. Le modèle du canal principal impérial d'Aragon (AIMC)

Les modèles linéaires sont généralement suffisants pour capturer les principales propriétés dynamiques des principaux biefs d'un canal d'irrigation en vue d'une conception contrôlée. Le retard peut être soit fixe et connu, soit fixe et inconnu, soit variant dans le temps avec une variation limitée ou non, le système à retard peut être représenté dans l'espace fréquentiel ou dans le temporel.

Nous utilisons dans une première partie un modèle de conduite du processus dynamique pour le bief du canal principal consistant en un système de second ordre avec retard, où tous les paramètres du modèle (y compris le retard) peuvent changer avec le temps :

$$T_1(t)T_2(t) \frac{d^2 \Delta y(t)}{dt^2} + (T_1(t) + T_2(t)) \frac{d \Delta y(t)}{dt} + \Delta y(t) = K(t) \Delta u(t - \tau(t)) \quad (2.3)$$

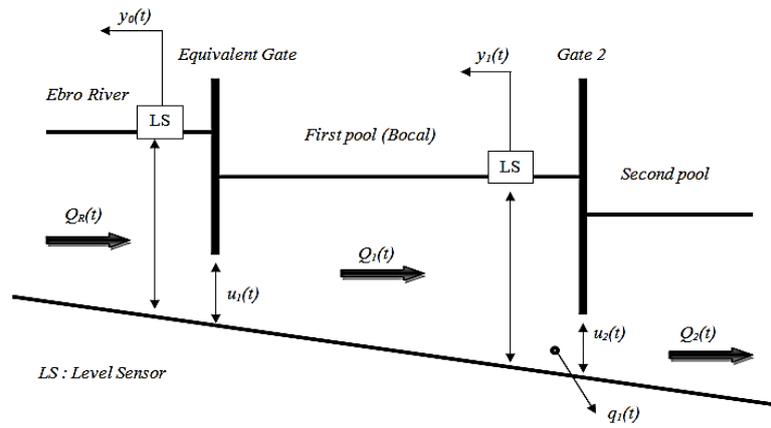
Les paramètres ne changent que lorsque le régime d'écoulement change, la dynamique du canal principal peut être décrite par cette fonction de transfert du régime nominal des principaux biefs du canal d'irrigation. (Merabti N et al, 2013) (Monje C A et al, 2010)

$$G(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{K}{(1 + T_1(s))(1 + T_2(s))} e^{-\tau s}$$

Le problème de contrôle d'un canal principal d'irrigation peut être défini comme le contrôle robuste du système défini par l'équation 2.3 dont les paramètres peuvent prendre des valeurs dans des plages spécifiques. Cela implique que le modèle de contrôle dynamique orienté doit inclure un ensemble de paramètres nominaux et la plage de variation de chacun de ses paramètres.

Le canal principal d'irrigation considéré dans cette partie est le canal principal Impérial d'Aragon (AIMC : Aragon Imperial Main Canal), qui tire son eau de la Rivière Èbro. (R Perez et al, 2011). L'AIMC est un canal à structure croisée de 108 km de long avec un débit nominal de  $30 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Il a une section trapézoïdale avec dix biefs de différentes longueurs qui sont séparés par des vannes d'écoulement inférieures.

La représentation de ce canal est donnée sur la figure 2.9. La variable manipulée  $u_1(t)$  est la position de la porte amont, et la sortie  $y_1(t)$  est le niveau d'eau d'extrémité aval.



**Figure 2.9.** Représentation du bief du principal canal d'irrigation

Où  $\Delta y_1(s)$  : variation du niveau d'eau en aval;

$\Delta u_1(s)$ : variation de position de vanne amont ;

$K$ : gain statique ;

$T_1, T_2$ : les constantes de temps;

$\tau$  : le retard.

Nous considérons que  $T_1$  est la constante de temps dominante (la plus grande associée à la dynamique du bief du canal), tandis que  $T_2$  est la plus petite constante de temps qui représente la dynamique des moteurs et portes, qui est beaucoup plus rapide que la dynamique du bief du canal.

Le modèle nominal du bief du canal est représenté par l'équation suivante (V. Feliu-Batlle et al, 2008) :

$$G(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{0.0401}{(1 + 880.79s)(1 + 81.27s)} e^{-360s}$$

Il est important de noter qu'un retard n'apparaît pas uniquement dans une fonction de transfert par une réalité physique. Dans bien des cas, afin de limiter l'ordre de la fonction de transfert lors de la phase d'identification, on choisit d'inclure un retard. Ce retard permet alors de décrire une partie de la dynamique du système d'une manière plus simple qu'en utilisant un ordre plus élevé (DJABRI, 2018).

De grandes variations des paramètres du modèle sont obtenues lorsque les régimes de décharge changent dans la plage de fonctionnement ( $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$ ) dans les plages suivantes :

$$0.01 \leq K(t) \leq 0.1$$

$$500 \leq T_1(t) \leq 15000$$

$$10 \leq T_2(t) \leq 300$$

$$300 \leq \tau(t) \leq 360$$

### 2.5.2. Le modèle du prototype de canal d'irrigation de l'institut IMTA

Le canal expérimental utilisé dans cette partie est situé à l'Institut mexicain de l'eau Technologie (IMTA) (BEGOVICH O et al, 2007). Le canal du laboratoire comprend quatre biefs (13 m, 12 m, 12 m et 13 m) et l'ensemble du canal mesure 50 m de long, 0.6 m de large et 1 m de profondeur. Le débit nominal est de 80 l/s. Le canal est de forme rectangulaire à pente nulle afin d'atteindre le délai le plus long possible, voir figure 2.10 (BEGHOVICH O et al, 2007a) (BEGHOVICH O et al, 2007b).

Les vannes coulissantes, en tant qu'ouvrages de contrôle, divisent le canal en quatre bassins et une servovalve ajuste le débit entrant. Une vanne manuelle à franchissement régule le niveau aval du canal. Chaque porte fonctionne en condition immergée et est équipée d'un actionneur linéaire et de deux capteurs de pression pour mesurer les niveaux amont et aval des portes, et d'un potentiomètre pour détecter la position de la porte et les interrupteurs de fin de course (ouverture maximale et minimale de la porte). Il n'y a pas de portes latérales.

Les variables contrôlées sont les niveaux d'eau en aval des trois premiers biefs et les variables de contrôle sont les ouvertures des vannes. (BEGHOVICH O et al, 2007c).

Notre choix s'est porté sur une branche du canal. Les structures de contrôle dans ce canal sont des portes coulissantes, divisant le canal en quatre biefs et une vanne ajustant le flux entrant. Une porte manuelle régule le niveau en aval du canal où chaque porte fonctionne en immersion. Cette dernière est équipée d'un actionneur linéaire et de deux capteurs de pression pour mesurer les niveaux amont et aval des vannes, et d'un potentiomètre pour détecter la

position des portes et limite les interrupteurs, c.à.d. l'ouverture maximale et minimale des portes.

Un canal d'irrigation peut être représenté comme une série de biefs. Pour un bief  $i$ , nous désignons  $u_i$  la variable de contrôle (débit) à l'extrémité amont,  $u_{i+1}$  la variable de contrôle à l'extrémité aval,  $y_i$  la variable contrôlée (profondeur de l'eau à l'aval du bief  $i$ ), et  $p_i$  les perturbations de la charge (prélèvement d'eau).

La dynamique du système entrées-sorties peut être décrite par un modèle qui peut être exprimé sous la forme  $Y(s) = H(s)u(s)$ , la fonction de transfert de  $u_i$  à  $y_j$  est notée  $H_{ij}$ .

Des réponses de niveau à une étape d'ouverture de la porte, on observe que les réponses au canal peuvent être reproduites par des systèmes du premier ordre, avec ou sans temporisation. Nous avons également de légers retards en raison des entrées et sorties sélectionnées et des contraintes physiques.

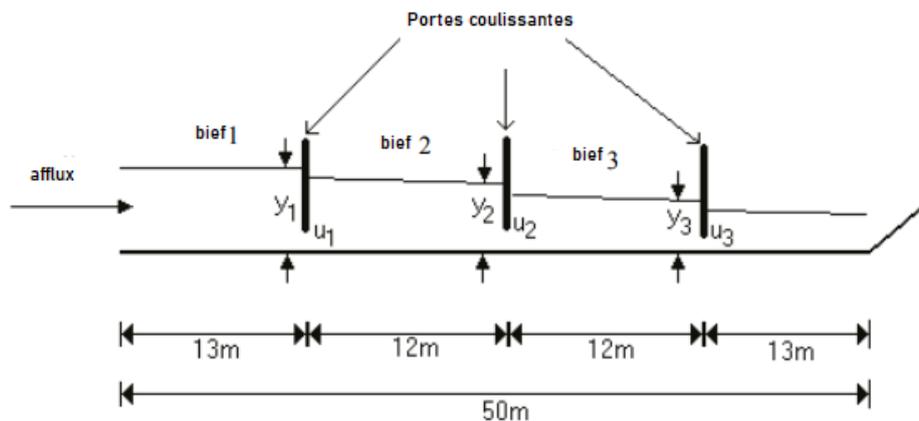


Figure 2.10. Schéma de prototype du canal hydraulique à 3 biefs

Pour trouver les fonctions de transfert formant une matrice de transfert, une procédure d'identification standard est utilisée :

La première étape consiste à déterminer les variables d'entrée et de sortie. Les écarts d'ouverture, par rapport au  $k$  ième point de consigne, des portes situées à l'extrémité aval des biefs sont les variables d'entrée. Ils sont désignés par:  $u_j^k (j = 1, 2, 3)$ , où  $j$  désigne le  $j$ ème bief et  $k (k = 1, 2, 3)$  le point de consigne. Les écarts de niveau d'eau en aval par rapport au point de consigne sont les variables de sortie. Ils sont désignés par :  $y_i^k (j = 1, 2, 3)$ , où  $i$  désigne le  $i$ ème bief du canal.

Pour l'identification, la variation du niveau d'eau  $y_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) est enregistrée lors de l'application d'un pas de position dans chaque porte  $u_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ). Les évolutions de niveaux en aval obtenues sont présentées dans (BEGHOVICH O et al, 2007) où les réponses au niveau aval sont très similaires à celles des systèmes linéaires, alors la dynamique du système entrée-sortie peut être décrite par un modèle qui peut être exprimé sous la forme suivante :

$$y(S) = H(S)u(S)$$

où

$$y(s) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} ; H(s) = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & h_{12}(s) & h_{13}(s) \\ h_{21}(s) & h_{22}(s) & h_{23}(s) \\ h_{31}(s) & h_{32}(s) & h_{32}(s) \end{bmatrix}$$

$$u(s) = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]$$

et  $h_{ij}$  représente le transfert de  $u_j$  vers  $y_i$ , chaque  $h_{ij}$  est estimé à l'aide d'une procédure d'identification graphique standard (BEGHOVICH O et al, 2007a).

Premièrement, à partir des réponses de niveau  $y_i$  à une étape d'ouverture de porte  $u_j$ , les réponses canal peuvent être reproduites par des systèmes du premier ordre, avec ou sans délai. Deuxièmement, à partir de chaque graphique de la réponse de niveau  $y_i$ , la constante de temps, le gain constant et le retard s'il est présenté sont déterminés. Dans notre prototype, nous avons de petits retards dus aux entrées et sorties sélectionnées et aux dimensions physiques. Ces retards sont négligés sauf dans quelques cas particuliers.

## *CHAPITRE III : Différentes Stratégies de Commande*

---

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes de commande choisies et appliquées aux systèmes de canaux d'irrigation à surface libre. Ces commandes doivent satisfaire de bonnes performances en termes de précision et d'effort de commande tout en étant robuste vis à vis des perturbations et des changements de paramètres ainsi qu'en présence de grands temps morts. Une comparaison judicieuse de ces techniques est effectuée incluant les fameux régulateurs PID, les régulateurs par prédicteur de Smith standard et avec filtrage ainsi que la commande robuste utilisant les gains principaux.

### 3.1. Introduction

Il existe une grande diversité d'approches possibles et envisageables pour développer la commande d'un canal d'irrigation. La différence entre les approches dépend de plusieurs facteurs tels que les variables de contrôle utilisées pour la commande, la logique de contrôle, la méthode de synthèse utilisée et le type de modèle utilisé pour cette synthèse (Dulhoste, 2001). Toutes les méthodes de commande automatique des canaux d'irrigation peuvent être classées en fonction de différents critères (Litrico X. , 2007), une classification de ces approches a été établie par (Malaterre P. O., 1998).

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement les fondements de base des différentes méthodes qui ont été appliquées sur les systèmes de canaux d'irrigation.

### 3.2. Les défis de la commande pour les canaux d'irrigation

L'analyse et la synthèse d'une loi de commande pour les systèmes dynamiques fait l'objet de nombreuses recherches. Il s'agit de chercher un modèle relativement simple permettant de mieux traduire le comportement d'un système à contrôler. L'étude de ces systèmes nécessite souvent la connaissance du comportement de modèle du procédé à contrôler, de l'évolution de ses composants au cours du temps, de ses interactions avec l'environnement extérieur ainsi que les contraintes qu'il subit (Malaterre P O & Baume J P, 1998). Le fameux contrôleur proportionnel intégral dérivé (PID) par exemple reste incapable de couvrir tous les besoins de performance dans le cas des processus industriels, généralement non linéaires, instables, et à grand retard pur.

Il faut toujours choisir les catégories de systèmes à temps continu que l'on souhaite considérer, ceux-ci peuvent être classés en deux espèces, selon qu'ils sont linéaires ou non. Schématiquement, la propriété de linéarité correspond au fait que le système ait une caractéristique entrée-sortie linéaire. Parmi les systèmes non linéaires, on retrouve tout d'abord des systèmes linéaires subissant des contraintes non linéaires, très fréquentes en pratique. D'autres systèmes ont un modèle intrinsèquement non linéaire, mais leur étude peut être restreinte au voisinage d'un point de fonctionnement nominal, où la caractéristique est linéaire par approximation. Ces deux premières catégories de systèmes peuvent être étudiées par le biais de techniques linéaires. Enfin, certains systèmes sont non linéaires et ne peuvent pas être étudiés autour d'un point de fonctionnement.

Ces considérations, montrent bien que la commande des systèmes hydrauliques à surface libre, qui sont des systèmes distribués non linéaires fortement perturbés incluant des temps de retard importants et de fortes non linéarités, présente un défi réel.

### **3.3. Le contrôle automatique des canaux d'irrigation**

La théorie du contrôle implique un processus en trois étapes : la modélisation du système, l'analyse du système et la conception du contrôleur, y compris la sélection de la structure du contrôleur et le calcul des paramètres de contrôle.

Toutes les méthodes de commande automatique des canaux d'irrigation peuvent être classées en fonction de différents critères (Litrico X. , 2007). Il existe une grande diversité d'approches possibles et imaginables pour développer la commande d'un canal d'irrigation, la différence entre les approches dépend de plusieurs facteurs tels que les variables de contrôle utilisées pour la commande, la logique de contrôle, la méthode de synthèse utilisée et le type de modèle utilisé pour cette synthèse (Dulhoste, 2001).

Le principe de l'automatisation d'un canal d'irrigation est d'installer des ouvrages le long de ce canal, à des endroits stratégiques, le choix de ces endroits est déterminé par des considérations techniques (courbes de remous, alimentation des prises, temps de retards) et économiques (limiter le nombre et le coût des ouvrages).

Selon l'emplacement de la variable contrôlée dans le système de contrôle, les concepts de contrôle des canaux peuvent généralement être classés en deux grands types de contrôle: le contrôle en amont, qui est le plus répandu dans les systèmes gérés de manière traditionnelle et le contrôle en aval qui nécessite une infrastructure moderne (transmission de l'information).

#### **3.3.1. Le contrôle en amont**

L'ajustement des structures de contrôle est basé sur les informations de rétroaction mesurées par des capteurs situés en amont. L'inconvénient est que seuls les niveaux ou les volumes peuvent être contrôlés avec cette approche lorsque la condition d'écoulement est sous-critique bien que la plupart des canaux fonctionnent dans des conditions d'écoulement sous-critique.

De cette façon, l'approvisionnement en eau en amont est transféré en aval vers les points de dérivation, et il permet une livraison orientée vers l'offre dans le système de transport d'eau.

### 3.3.2. Le contrôle aval

Le réglage des structures est basé sur les informations de retour mesurées par des capteurs situés en aval, les variables contrôlées étant situées en aval des variables de contrôle. Par exemple, le niveau d'eau en aval dans un bief du canal est contrôlé par une porte située à la partie amont du bief. Toutes les variables peuvent être contrôlées par le contrôle en aval. L'exploitation du canal avec contrôle en aval transforme les demandes en aval vers la source en amont et est donc compatible avec les concepts de livraison orientés vers la demande dans le système de transport.

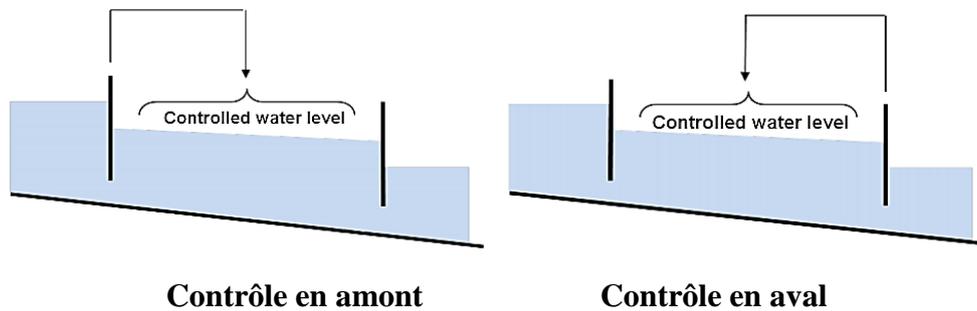


Figure 3.1. Directions du contrôle

### 3.3.3. La logique de contrôle

Il existe deux principaux types de contrôle pour les systèmes hydraulique à surface libre, le contrôle en boucle ouverte et le contrôle en boucle fermée (Horvath, 2013).

On peut définir clairement la notion de "Boucle Fermée" (BF) ou "Compensation" ("Closed Loop" ou "Feedback") et de "Boucle Ouverte" (BO) ou "Anticipation" ("Open Loop" ou "Feedforward") suivant la nature des informations utilisées pour calculer les commandes du système (Dulhoste, 2001). Les contrôleurs d'irrigation sont divisés approximativement en deux classes principales : Contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée.

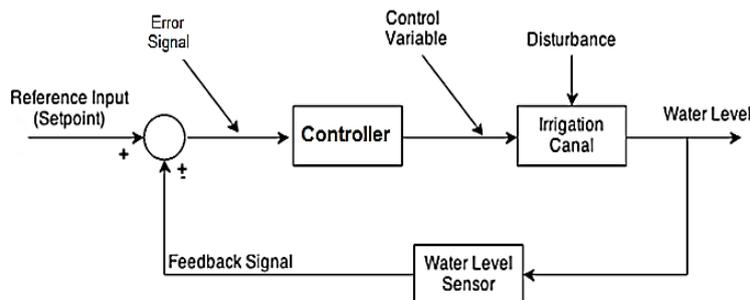


Figure 3.2. Contrôle en boucle fermée d'un système d'irrigation

**3.3.3.1. Le contrôle en boucle ouverte :**

La commande  $U$  est calculée à partir des consignes  $Y_c$  et une estimation de la perturbation  $\hat{P}$ . Celle-ci pouvant de cette façon compenser les retards du système en anticipant les besoins des usagers. La BO n'est généralement pas suffisante car les perturbations sont en général très difficiles à estimer, elle peut compenser les retards mais le système a besoin d'informations qui doivent être approximées à partir des données climatiques, agronomiques, sociologiques et de la consommation d'eau passée. Une boucle ouverte est insuffisante en raison des erreurs du modèle, des perturbations inconnues.

En général il est nécessaire de mettre en œuvre les deux logiques en même temps comme le montre la figure suivante :

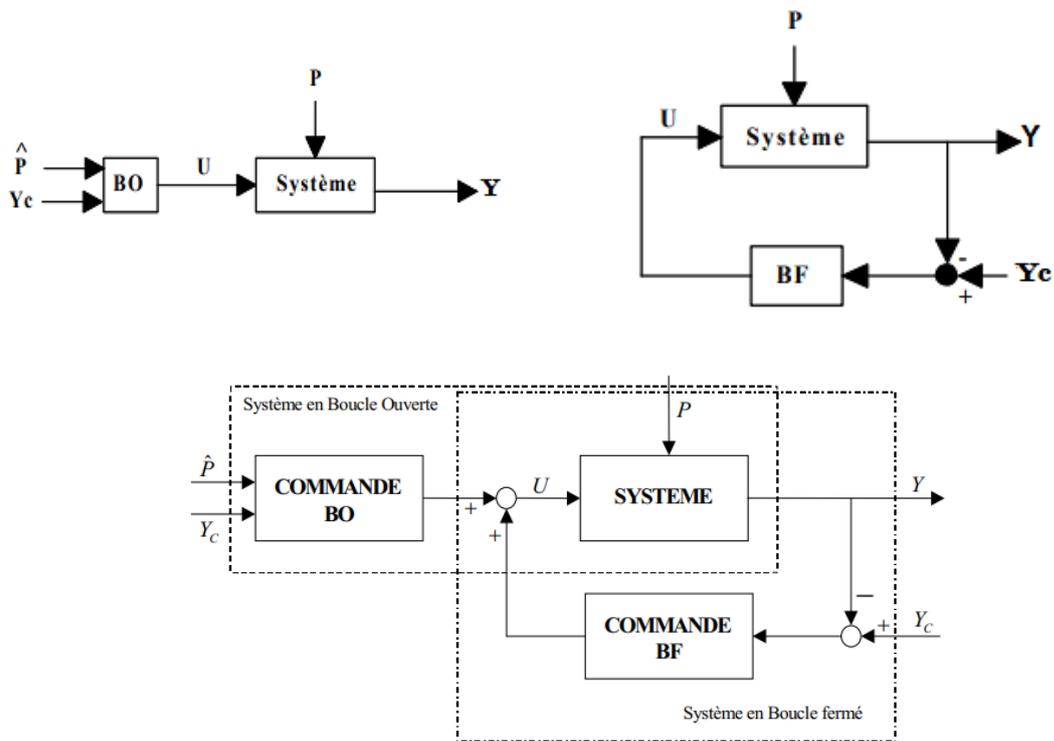


Figure 3.3. Logique de contrôle boucle ouverte boucle fermée

### 3.3.3.2. Le contrôle en boucle fermée

Elle est permet d'établir une commande  $U$  en fonction de l'erreur mesurée entre les variables mesurés  $Y$  et les consignes  $Y_C$ . Les perturbations  $P$ , même inconnues, sont prises en compte indirectement à travers leurs effets sur la sortie  $Y$  du système car elles affectent le rendement du système. La BF n'est pas suffisante surtout dans les systèmes de canaux ouverts avec de très grands temps de retards, les boucles fermées peuvent être appliquées à toutes les variables contrôlées. Il existe deux types de boucles fermées dans le contrôle du niveau d'eau dans les canaux en fonction de l'emplacement relatif de l'action de contrôle et de la variable contrôlée : le niveau d'eau peut être contrôlé par la modification du débit amont (contrôle aval par rétroaction, FBdn) ou la modification de l'eau en aval niveau (contrôle amont de rétroaction, FBup). Le contrôle de rétroaction repose directement sur les mesures, il peut être amélioré en introduisant un contrôle par anticipation ou en construisant des volumes de stockage. Cependant, c'est une solution coûteuse, une seule boucle fermée ne peut fonctionner correctement que si des volumes de stockage sont disponibles.

Étant donné que les commandes en boucle ouverte et en boucle fermée ont leurs limites, la combinaison des deux est souvent utilisée. Dans le cas d'un système multi-variable, plusieurs boucles de régulation et plusieurs contrôleurs de logiques différents peuvent être combinés. Par exemple, dans le cas des canaux d'irrigation, les débits peuvent être contrôlés en boucle ouverte et les cotes (niveaux) en boucle fermée. (Malaterre P. O., 1998).

Habituellement, le débit est contrôlé en boucle ouverte et le niveau d'eau est contrôlé en boucle fermée, car la boucle ouverte n'a pas besoin de mesures, mais uniquement d'estimations et le niveau d'eau est plus facile à mesurer. Ce travail se concentre sur le contrôle en boucle fermée (rétroaction).

Il est aussi possible de développer des commandes à deux étapes, et de cette façon faire varier la consigne de la commande en boucle fermée  $\hat{Y}_C$  en fonction des besoins estimés  $\hat{P}$ , cela avec une commande en boucle ouverte, cette stratégie est présentée par la figure suivante :

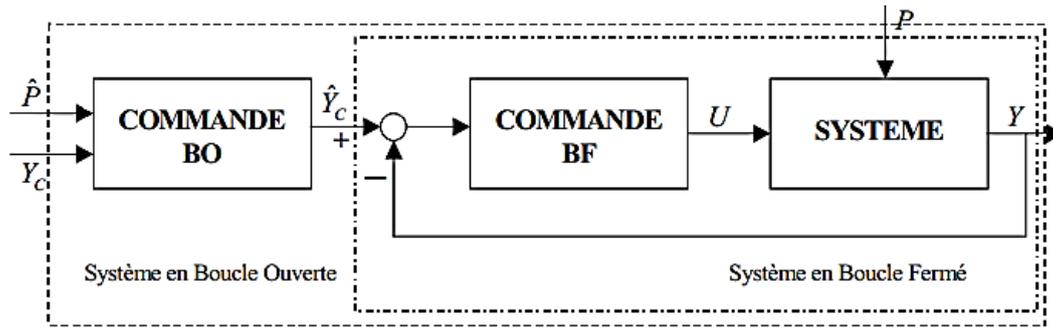


Figure 3.4. Logique de contrôle boucle ouverte boucle fermée à deux étapes

### 3.4. Commande robuste par la méthode des gains principaux

L'intérêt de la présente partie du travail est d'étudier une méthode de la commande robuste très peu utilisée pour les systèmes hydrauliques, mais qui est aussi simple et bien adaptée. Cette méthode est la méthode des gains principaux dont on présente les fondements théoriques de base.

#### 3.4.1. La commande robuste

La robustesse consiste à assurer qu'un système conserve certaines de ses qualités et qu'il garantit un certain degré de stabilité ou de performance lors de variations de ses conditions de travail (LAROCHE, 2007) ou en présence de perturbations. Elle traduit l'invariance du comportement entrée-sortie vis-à-vis des incertitudes de modélisation et/ou de la variation de certains paramètres du processus à commander (Doyle J C and Stein G, 1981).

##### 3.4.1.1. Robustesse d'un contrôleur

On dit d'un contrôleur qu'il est robuste si son comportement ne change pas significativement lorsque le système auquel il est associé change de point de fonctionnement. Afin de décrire de telles perturbations, différents modèles d'incertitudes ont été adoptés conduisant à différents axes de recherches, l'analyse de la robustesse s'appuie généralement sur la formulation d'un modèle variant dans le temps, variation qui peut s'exprimer en fonction d'un certain nombre de paramètres incertains.

### 3.4.1.2. Synthèse de la loi de commande robuste

Une loi de commande robuste a pour objectif d'obtenir un fonctionnement acceptable d'un système réel dans son contexte normal d'utilisation qui est dans notre cas le canal d'irrigation, et de générer une loi de commande qui satisfait les conditions de robustesse. Pour l'obtenir, il est donc nécessaire de prendre en compte les imperfections de modélisation. Le modèle du procédé se compose d'une famille de systèmes (éventuellement non linéaires et de dimension infinie) définie à partir d'un modèle nominal, cette famille est donnée en spécifiant soit des perturbations sur le système nominal soit des incertitudes sur le système.

L'utilisation de techniques de synthèse de contrôleurs garantissant une « robustesse » est une caractéristique non négligeable ; les commandes devront assurer la stabilité d'une gamme de modèles, défini par le modèle de synthèse (appelé aussi modèle nominal) et par les incertitudes entre les différents modèles considérés. Il faut aussi veiller à satisfaire un fonctionnement optimal, c'est-à-dire offrir les meilleures performances possibles pour le procédé en boucle fermée. On rappelle que les contraintes rencontrées lors de la synthèse des contrôleurs robustes sont :

- La synthèse s'effectue sur le modèle nominal du système, mais il est essentiel de garantir la stabilité de tous les régimes.
- Satisfaire le compromis « Stabilité / Performances » pour un fonctionnement optimal.

Plus précisément, étant donné des spécifications fréquentielle sur les incertitudes paramétriques et les performances, la théorie évalue la faisabilité, produit une loi de commande adaptée, et fournit une garantie sur le domaine de validité de cette loi de commande robuste. Il existe un grand nombre de méthode de synthèse de commande robustes.

### 3.4.1.3. Spécification robuste

On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Plusieurs techniques de commande robuste ont été développées pour garantir la stabilité et un niveau de performance acceptable pour les systèmes commandés malgré des incertitudes paramétriques agissant sur le modèle.

Ses objectifs sont passés de garantir la robustesse d'un modèle nominal, à garantir la robustesse de systèmes réels en prenant en compte toutes les incertitudes possibles ; autrement dit trouver un contrôleur qui assure la stabilité et satisfaire les performances et

aboutir à un comportement stable du procédé commandé. La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et le plus délicat.

- L'analyse de la robustesse en stabilité consiste à établir si le système demeure stable malgré les variations attendues des paramètres. On peut aussi souhaiter que le système maintienne certaines performances.
- L'analyse de la robustesse en performance cherche à établir si le système maintient les performances prévues pour les variations attendues des paramètres ; (LAROCHE, 2011-2012)

Nous nous intéressons aux notions de robustesse, en rappelant les conditions de robustesse qui en découlent, conditions que nous utilisons par la suite pour synthétiser un contrôleur robuste par la technique des gains principaux assurant les objectifs de robustesse pour les régimes de fonctionnement nominal et perturbé.

Dans le cadre de notre travail, on s'est intéressé tout particulièrement à la commande robuste car elle présente une solution plus performante aux problèmes cités auparavant. C'est un type de commande qui vise à garantir les performances et la stabilité d'un système face à des perturbations du milieu et les incertitudes du modèle.

Des techniques de contrôle robuste peuvent paraître intéressantes car les non-linéarités des systèmes induisent des erreurs sur les modèles et les perturbations inconnues peuvent être importantes.

### 3.4.1.4. Spécifications traditionnelles

Pour la plus part des gens le concept de la performance d'un système est relatif aux propriétés du système en boucle fermée à savoir le suivi de la consigne et le rejet des perturbations (Hamlaoui, 2015). Cependant, il convient de distinguer entre :

- *Les conditions liées à la robustesse de la stabilité* : le système bouclé doit rester stable quelles que soient les variations du processus.
- *Les performances liées au comportement du processus* : la réponse du système bouclé doit rester acceptable en dépit des fluctuations des caractéristiques du processus.

Les performances d'un processus peuvent s'exprimer sous divers aspects : temps de réponse, bande passante, rejet de perturbations, dépassements admissibles, etc.

Les spécifications vont être divisées en deux groupes :

- \* Spécifications dans le domaine temporel.
- \* Spécifications dans le domaine fréquentiel.

La méthode classique de tester la robustesse d'un système est de spécifier les marges de stabilité en utilisant les marges de gain et de phase, toutes ces notions seront utilisées pour la synthèse de contrôleurs robustes par la méthode des gains principaux, et les spécifications de commande se matérialisent classiquement dans le triplet (bande passante, dépassement, précision).

### 3.4.2. Le contrôle robuste des Canaux d'irrigation

Le choix de la logique de contrôle est un choix très important qui a un lien fort avec la méthode de distribution de l'eau (à la demande ou au tour d'eau). Ce choix est également en relation directe avec le choix des variables de contrôle et des variables à contrôler. Ce choix, à son tour a un impact important sur les modèles dynamiques sous-jacents et sur leurs caractéristiques (dynamique lente ou rapide, avec ou sans retard, mode oscillants ou non, etc.).

Il faut faire la synthèse d'un contrôleur qui remplisse le cahier des charges. Pour les modèles, nous distinguerons les modèles de simulation qui sont des modèles les plus complets possibles (réalisables) et qui servent à une validation préliminaire, et les modèles pour la commande qui sont des modèles simplifiés directement utilisables pour synthétiser le contrôleur.

#### 3.4.2.1. Contrôleur mono-variable et contrôleur multi-variable

Un contrôleur est dit mono-variable (en entrée et en sortie) s'il ne considère qu'une entrée et qu'une sortie (les variables étant entendues au sens scalaire et non pas au sens vectoriel). Les méthodes mono-variables sont parfois appelées SISO pour « Single Input, Single Output ». Un contrôleur est dit multi-variable (en entrée et en sortie) s'il considère plusieurs entrées et plusieurs sorties (les variables étant entendues au sens vectoriel et non pas au sens scalaire). Les méthodes multi-variables sont parfois appelées MIMO pour « Multiple Input, Multiple Output ».

La commande multi-variable qui sera étudiée par la suite devra être suffisamment simple pour pouvoir être implémentée par quelqu'un qui n'est pas familier avec les techniques pointues de

l'automatique. C'est pourquoi du fait de sa simplicité, notre choix s'est porté sur une commande robuste pour appréhender l'aspect multi-variable du système.

Nous avons utilisé un modèle hydraulique simplifié pour modéliser le système physique, ce qui est aussi une autre limite dans nos méthodes. Le transfert d'eau est exprimé par un temps de retard pur ( $\tau_i$ ) dans un bief. Le retard, considéré comme un des problèmes les plus difficiles rencontrés dans la commande des systèmes, a une influence considérable sur le comportement d'un système bouclé et peut même être à l'origine d'instabilité ou d'oscillations indésirables.

### 3.4.2.2. Système mono-variable SISO et Système Multi-variables MIMO

Un système SISO est un système mono-variable à une seule entrée  $p$  et à une seule sortie  $q$ , c.à.d.  $p = q = 1$ .

Un système MIMO est un système multi-variable à plusieurs entrées et à plusieurs sorties, i.e.,  $p > 1$  et  $q > 1$ .

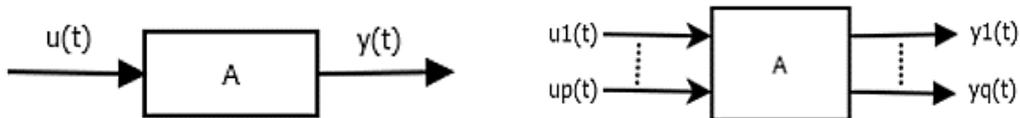


Figure 3.5. Système SISO et Système MIMO

Considérons le système bouclé de la figure 3.6, dans lequel  $G(s)$  représente la matrice de transfert d'un système multi-variable, de dimensions  $p \times q$  et  $K(s)$  celle d'un régulateur de dimension  $q \times p$ , On appelle :

- $r$  le signal de référence que doit suivre la sortie (entrées)
- $y$  la sortie du système,
- $u$  la commande (sortie du régulateur),
- $d$  des perturbations affectant la sortie du système,
- $w$  les bruits de mesure,
- $\varepsilon = r - y$  l'erreur d'asservissement,
- $Q(s) = G(s)K(s)$  la matrice de transfert de boucle ouverte,

La configuration des systèmes multi-variables en boucle fermée avec perturbations est illustrée sur la figure ci-dessous :

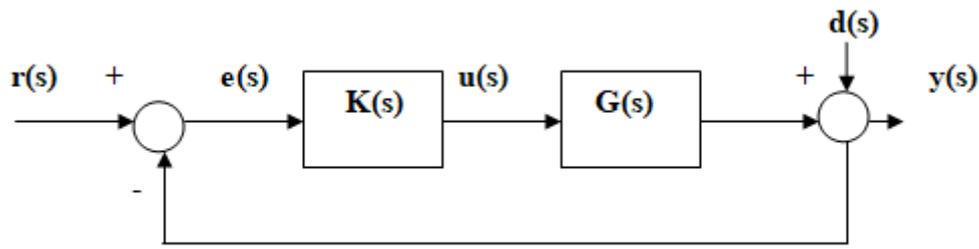


Figure 3.6. Configuration des systèmes multi-variables

### 3.4.2.3. Analyse des systèmes bouclés

L'analyse de propriétés d'un système bouclé multi-variable utilise les notions principales suivantes (Alazard D et al, 1999):

- La stabilité nominale est la première des propriétés à assurer : la commande, appliquée au modèle de commande du système (appelé modèle nominal), doit évidemment stabiliser celui-ci.
- Les performances nominales sont des propriétés plus exigeantes, qui consistent à garantir que le modèle nominal de commande bouclé possède des propriétés de performances (précision et rapidité de la réponse notamment) satisfaisantes.
- La robustesse en stabilité est obtenue si la commande calculée à partir du modèle nominal du système assure la stabilité en boucle fermée d'un système qui diffère du modèle nominal ; cela revient à vérifier que la stabilité continue à être assurée malgré les incertitudes du modèle. Pour étudier cette propriété, il convient au préalable de définir les incertitudes de modélisation vis-à-vis desquelles on veut garantir la stabilité.

Le but de toute commande  $u(s)$  obtenue à partir d'un contrôleur  $K(s)$  est d'essayer de toujours avoir un signal d'erreurs  $e(s)$  le plus faible possible (nul dans le cas idéal).

Au préalable, on présente les différents signaux avec leurs expressions.

Le signal de sorties du procédé en boucle fermée :

$$y(s) = G(s)u(s) + d(s) \quad (3.1)$$

Le signal de commandes  $u(s)$  se met sous la forme :

$$u(s) = K(s)e(s) \quad (3.2)$$

Le signal d'erreurs  $e(s)$  est déduit à partir de l'expression :

$$e(s) = r(s) - y(s) \quad (3.3)$$

En remplaçant le signal d'erreurs  $e(s)$  par l'expression (3.3), les commandes  $u(s)$  deviennent :

$$u(s)K(s)(r(s) - y(s)) \quad (3.4)$$

On substitue le signal de commandes  $u(s)$  par l'expression (3.4), le signal de sortie sera :

$$y(s) = G(s)K(s)(r(s) - y(s)) + d(s) \quad (3.5)$$

Après simplification de l'expression du signal de sorties  $y(s)$ , on aboutit à

$$y(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}G(s)K(s)r(s) + (I + G(s)K(s))^{-1}d(s) \quad (3.6)$$

On définit les matrices de transfert suivantes :

— Boucle ouverte :

$$L(s) = G(s)K(s) \quad (3.7)$$

— Sensibilité :

$$S_y(s) = (I + L(s))^{-1} \quad (3.8)$$

$S_y(s)$  est appelée matrice de sensibilité en sortie, elle représente la matrice de transfert entre la référence  $r$  et l'erreur  $\varepsilon$  ; elle traduit l'influence des perturbations sur la sortie et sur l'erreur  $\varepsilon$ .

— Sensibilité complémentaire (Transfert) : (3.9)

$$T_y(s) = L(s)(I + L(s))^{-1}$$

$T_y(s)$  est appelée matrice de sensibilité complémentaire en sortie, elle représente la matrice de transfert entre la référence  $r$  et la sortie  $y$  ; elle traduit l'influence des bruits de mesure sur la sortie et sur l'erreur  $\varepsilon$ .

$T_u(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}K(s)G(s)$  est appelée matrice de sensibilité complémentaire en entrée et elle représente la matrice de transfert entre la perturbation  $d$  et la commande  $u$ .

— Complémentarité Sensibilité - Transfert :

Les matrices de transfert  $T(s)$  et  $S(s)$  sont complémentaires, cette complémentarité rappelle le dilemme ou le compromis naturel qui existe entre la stabilité et les performances d'un système ; donc tout ajustement sur la stabilité engendre un ajustement sur les performances.

$$S(s) + T(s) = I \quad (3.10)$$

— Transfert par rapport à la commande :

$$R(s) = K(s)(I + L(s))^{-1} \quad (3.11)$$

Dans le cas où le signal des perturbations est nul ( $d = 0$ )

$$y(s) = (I + G(s)K(s))^{-1} G(s)K(s)r(s) = T(s)r(s) \quad (3.12)$$

$$U(s) = K(s)(r(s) - y(s)) = K(s)(I - T(s))r(s) = (K(s)S(s))r(s) = R(s)r(s) \quad (3.13)$$

$$e(s) = r(s) - y(s) = (I - T(s))r(s) = S(s)r(s) \quad (3.14)$$

Dans la partie suivante nous allons faire un rappel sur les normes matricielles et sur l'analyse des propriétés d'un système bouclé multi-variable. Ainsi, nous nous intéressons aux notions de robustesse, en rappelant les conditions de robustesse qui en découlent, conditions que nous utilisons par la suite pour synthétiser un contrôleur robuste assurant les objectifs de robustesse. (LARABI, 2008), la stabilité et les bonnes performances des systèmes multi-variables en boucle fermée sont les priorités pour la commande robuste.

### 3.4.3. Normes matricielles

Le modèle nominal (ou de référence) admet une réalisation dans l'espace d'état. Il est possible d'écrire le modèle d'état sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix}\end{aligned}$$

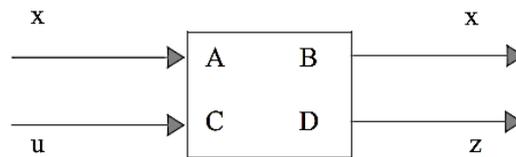


Figure 3.7. Schéma fonctionnel

Ou  $x$  : Vecteur d'état,  $y$  : Vecteur d'observation et  $A, B, C, D$  : Matrices d'état

Avec l'hypothèse des conditions initiales nulles sur le vecteur d'état, le modèle nominal peut également prendre une représentation fréquentielle, sous la forme d'une matrice de transfert  $G(s)$  obtenue par l'expression ci-dessous :

$$G(s) = C(sI + A)^{-1}B + D \quad (3.15)$$

### 3.4.3.1. Valeurs singulières (ou gains principaux)

La norme de matrice induite par la norme euclidienne de vecteurs est la plus grande valeur singulière, notée  $\bar{\sigma}(A)$ , pour  $A$  matrice complexe non nécessairement carrée ( $A \in \mathbb{C}^{n \times m}$ ) (Mac Farlane A.G.J et al., 1977).

Les valeurs singulières sont les racines carrées des valeurs propres de  $(AA^*)$  et de  $(A^*A)$  ( $A^*$  désignant la matrice transposée conjuguée de  $A$ ).

On montre que :

$$\bar{\sigma}(A) = \max \|Ax\| \equiv \sqrt{\lambda_{\max}[A^*A]} \quad (\|x\| = 1) \quad (3.16)$$

On notera  $\underline{\sigma}(A)$  la plus petite valeur singulière :

$$\underline{\sigma}(A) = \min \|Ax\| \equiv \sqrt{\lambda_{\min}[A^*A]} \quad (\|x\| = 1) \quad (3.17)$$

### 3.4.3.2. Nombre de conditionnement d'une matrice

Dans le cas d'une matrice  $A$  (éventuellement complexe), le rapport de sa valeur singulière maximale sur sa valeur singulière minimale est appelé nombre de conditionnement. Ce

nombre est un indicateur de la difficulté à inverser cette matrice. C'est-à-dire, qu'une faible modification sur la matrice  $A$  donne une matrice inverse très différente, on parle alors de forte sensibilité.

$$cond = \frac{\bar{\sigma}(A)}{\underline{\sigma}(A)} \quad (3.18)$$

On dit qu'un système multi-variable est mal conditionné si le rapport entre les valeurs singulières maximales et minimales est important.

### 3.4.3.3. Représentation des incertitudes

Le modèle de commande d'un système, quelle que soit la façon dont il a été obtenu, n'est qu'une approximation et il subsiste en effet toujours un certain nombre d'incertitudes qui sont essentiellement de deux types : les incertitudes paramétriques et les incertitudes de modélisation.

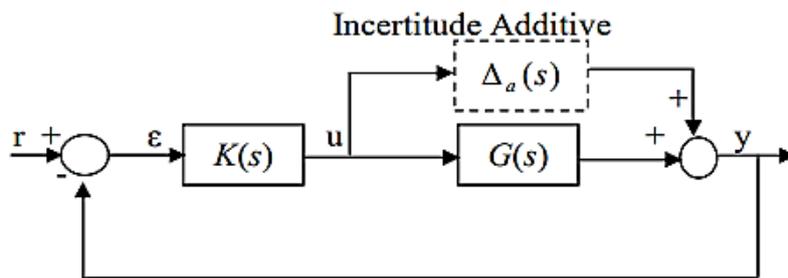
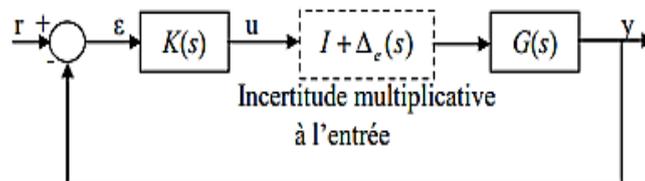
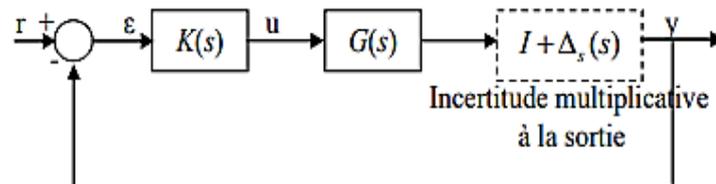


Figure 3.8. Configuration générale d'un système bouclé perturbé soumis à des perturbations additives



(a) système bouclé soumis à des perturbations multiplicatives à l'entrée



(b) système bouclé soumis à des perturbations multiplicatives à la sortie

Figure 3.9. (a)(b) configuration générale d'un système bouclé soumis à des perturbations multiplicatives

Avec :  $u$ : commande,  $y$ : sortie,  $r$ : référence,  $\varepsilon$ : écart,  $G(s)$  : matrice de transfert du système,  $K(s)$  : matrice de transfert du contrôleur,

$\Delta_a(S)$  : la matrice de transfert de l'incertitude additive. ) ( $\Delta_s(S)$  : la matrice de transfert de l'incertitude multiplicative à la sortie) ( $\Delta_e(S)$  : la matrice de transfert de l'incertitude multiplicative à l'entrée.

Nous savons que toute mise en équations d'un processus physique nécessite des approximations, d'où résultent par conséquent des erreurs de modèle. La représentation de celles-ci peut être exprimée sous différentes formes, suivant le degré d'information qu'on souhaite voir apparaître : la représentation de ces incertitudes qu'on adopte par la suite doit être sous une forme simple à utiliser sur le plan mathématique. D'après les schémas bloc présenté par les Figures (3.8 et 3.9) les incertitudes peuvent être modélisées sous forme (Milich L et al., 1986):

—*Additive* : on peut représenter toutes les incertitudes sous une forme globale, par exemple en considérant que la matrice de transfert du système  $G_p(j\omega)$  s'écarte d'une matrice de transfert nominale  $G(j\omega)$  d'une quantité  $\Delta_a(j\omega)$ , ce qui s'écrit (Figure 3.8) :

$$G_p(j\omega) = G(j\omega) + \Delta_a(j\omega) \text{ avec } \|\Delta_a(j\omega)\| < \delta_a(\omega) \quad \forall \omega, \quad (3.19)$$

Où  $\delta_a(\omega)$  représente la borne supérieure d'une norme de l'incertitude de modèle.

—*Multiplicative* : il peut s'avérer préférable de relativiser  $\Delta_a$  par rapport à  $G$ , ce qui peut se faire en adoptant l'une des deux formes suivantes, dites multiplicatives directes (Figure 3.9) :

$$G_p(j\omega) = (I_p + \Delta_s(j\omega))^{-1} \quad \text{avec } \|\Delta_s(j\omega)\| < \delta_s(\omega) \quad \forall \omega, \quad (3.20)$$

$$G_p(j\omega) = G(j\omega)(I_p + \Delta_e(j\omega))^{-1} \quad \text{avec } \|\Delta_e(j\omega)\| < \delta_e(\omega) \quad \forall \omega, \quad (3.21)$$

Notons que dans les cinq formulations retenues,  $\Delta \equiv 0$  correspond à l'absence d'incertitude de modélisation. L'utilisation de ces cinq formes d'incertitudes est générale, car elles

permettent de traiter par le même formalisme les incertitudes de nature diverse, comme par exemple :

- Les erreurs de modélisation concernant les actionneurs (dont la dynamique peut être mal connue ou négligée) ; elles sont prises en compte en utilisant l'une des deux formes directe ou inverse en entrée.
- Les erreurs de modélisation concernant les capteurs ; elles sont prises en compte par l'une des deux formes en sortie.
- L'utilisation d'un modèle simplifié, en vue de faciliter le calcul de la commande, peut se représenter par n'importe laquelle des cinq formes.
- La présence de non-linéarité peut également être prise en compte par l'une des cinq formes.

#### **3.4.3.4. Les spécifications sur la stabilité et sur les performances**

Considérons un système bouclé dont la matrice de transfert nominale de boucle ouverte est  $G(s)$ , soumis à des incertitudes de modélisation de forme multiplicative à la sortie représentées par l'équation citées auparavant (Yahmedi, 1993). Les spécifications sur la stabilité et sur les performances du système soumis à des incertitudes de modélisation sont présentées par la suite.

La synthèse d'une loi de commande se fait généralement sur un modèle nominal simplifié qui ne prend pas en compte toute la complexité du système, des dynamiques sont négligées, les valeurs des paramètres du modèle sont considérés égales à leurs valeurs nominales.

Afin de connaître si une loi de commande est robuste, des contraintes sur la stabilité et sur les performances sont considérées. On rappelle les considérations pour la synthèse de commande robuste sont :

- Poursuite des grandeurs de sorties ;
- Rejet de l'effet de perturbations ;
- Sensibilité aux incertitudes de modèles ;
- Bonne marge de stabilité ;
- Sensibilité aux bruits de mesures.

*a) Spécification sur la stabilité*

Dans notre étude nous considérons les perturbations paramétriques comme des incertitudes multiplicatives à la sortie, qui sont l'écart entre le modèle de synthèse simplifié et le modèle du régime de fonctionnement réel.

D'après l'équation

$$G_p(j\omega) = (I_p + \Delta_s(j\omega)) G(j\omega) \quad (3.22)$$

On a alors la perturbation paramétrique multiplicative  $\Delta_s(j\omega)$  définie par :

$$\Delta_s(j\omega) = (G_p(j\omega) - G(j\omega)) G^{-1}(j\omega) \quad (3.23)$$

D'où la norme de la perturbation multiplicative à la sortie exprimée par les valeurs singulières maximales données par :

$$\bar{\sigma}[\Delta_s(j\omega)] = \bar{\sigma} [(G_p(j\omega) - G(j\omega)) G^{-1}(j\omega)] \quad (3.24)$$

La relation (3.24), traduit qu'en basses fréquences on ne peut pas tolérer une incertitude de 100%, mais en hautes fréquences l'incertitude croit et dépasse les 100% (Doyle J C and Stein G, 1981). D'où la spécification sur la stabilité  $W_t(j\omega)$  donnée par la relation suivante (Stein M & Athans G, 1987) :

$$\bar{\sigma}[\Delta_s(j\omega)] = \bar{\sigma}[W_t(j\omega)] \forall \omega \quad (3.25)$$

D'après la relation (3.25), la spécification sur la stabilité  $W_t(j\omega)$  représente la borne supérieure d'une perturbation paramétrique  $\Delta_s(j\omega)$ .

*b) Spécification sur les performances*

La spécification sur les performances est de la forme suivante :

$$W_p(s) = \left( \frac{1+\alpha.s}{\alpha.s} \right) I_n \quad (3.26)$$

La relation (3.26) est choisie de telle sorte que l'erreur statique soit nulle. Le temps de réponse du système en boucle fermée doit être du même ordre de grandeur que celui du

processus en boucle ouverte et sa réponse ne doit pas contenir de dépassement important c'est-à-dire douce.

Concrètement, la robustesse sur les performances signifie que les performances désirées sont garanties pour tous les modèles perturbés tenu en compte dans la synthèse. Parmi les performances que doit satisfaire le contrôleur  $K(s)$ , on cite :

- La régulation face aux effets de perturbations : insensibilité des sorties face aux perturbations agissant sur le système ;
- Le découplage des entrées/ sorties des systèmes ;
- La limitation des signaux critiques : délivrer aux actionneurs des signaux acceptables et surtout tolérables.

### 3.5. Application des différentes stratégies de commande

Les contrôleurs modernes sont basés sur l'utilisation de modèles mathématiques. Cependant, les modèles sont toujours obtenus grâce à une réduction de la complexité de la réalité et par conséquent, leur capacité à représenter correctement le comportement général des processus est très limitée. Il est avantageux d'analyser le problème résultant de l'incertitude du modèle dans le contrôle des principaux biefs du canal d'irrigation. Ce problème a souvent été ignoré dans les études théoriques et dans le contrôle pratique des processus. Il était question de faire une sorte de réduction de modèle pour obtenir un modèle suffisamment simple pour pouvoir appliquer des méthodes de commande.

#### 3.5.1. La méthode des gains principaux

Le principe de la méthode des gains principaux est basé sur la recherche d'un contrôleur avec la structure suivante (Yahmedi, 1993) :

$$K(s) = K1 * K2(s) * K3(s) * K4(s) \quad (3.27)$$

Où,

$K1 = G^{-1}(0)$ : est l'inverse du gain statique, utilisé pour découpler le processus en basse fréquence.

$K2(s) = \frac{1}{s}$  Est un ensemble d'intégrateurs pour éliminer l'erreur statique.

$K3$  est un coefficient de compromis entre la stabilité et les performances.

$K4(s)$  est une structure permettant de réduire l'amplitude de résonance en moyenne et haute fréquence, afin de ne pas affecter le contrôleur en basse fréquence,

Nous devons régler  $K4(0) = I$ , cela peut être obtenu en minimisant les critères suivants (Doyle J C and Stein G, 1981)

$$\min K4(J) = \min K4 \max_w [\sigma_{\max}(T)\sigma_{\max}(\Delta m)] \quad (3.28)$$

Où:  $\sigma_{\max}(T) * \sigma_{\max}(\Delta m)$  est la condition de robustesse sur la stabilité

Dans la partie suivante, on montrera la méthode des gains principaux sur la manière de tirer profit de la rétroaction face aux incertitudes. Ensuite, on présentera un exemple qui illustre l'utilisation d'un contrôle robuste pour fournir des performances satisfaisantes.

L'approche moderne standard, pour le contrôle de processus consiste à construire un modèle mathématique du processus mono-variable puis multi-variable puis à utiliser explicitement ces modèles dans le contrôleur. Cependant, cette approche pose deux problèmes majeurs : premièrement, le modèle n'est qu'une représentation simplifiée du processus qui est généralement beaucoup plus complexe ; deuxièmement, le comportement du processus change continuellement.

Ces incertitudes de modèle sont responsables de la dégradation du contrôleur. Par conséquent, la première étape d'une étude de contrôle robuste consiste à quantifier ces incertitudes.

#### **3.5.1.1. Commande robuste mono-variable pour un canal d'irrigation**

A cet effet, un canal principal d'irrigation est utilisé, des expériences basées sur la réponse l'entrée ont été réalisées au premier bief afin d'obtenir un modèle mathématique linéaire permettant de décrire son comportement dynamique (Feliu-Batle V et al.).

Le cas présenté dans cette partie de la thèse concerne le premier bief du principal canal Impérial d'Aragon (AIMC) qui présente de grandes variations dans ses paramètres caractéristiques. Le comportement dynamique du premier bief du canal peut être représenté par un modèle de second ordre avec retard en faisant varier les conditions de fonctionnement (Gastillo-Garcia F.J et al., 2011). Des modèles pour quatre conditions de fonctionnement, différentes des conditions nominales sont obtenus et leurs incertitudes multiplicatives sont également déterminées, dans l'étape suivante, un contrôleur robuste avec une méthode de gains principaux est obtenu pour les biefs du principal canal d'irrigation. Il est nécessaire de rappeler les performances de base requises d'une boucle de contrôle dans le domaine fréquentiel.

La figure montre la structure classique d'une boucle de contrôle avec les principaux composants: le contrôleur (matrice de transfert  $K(s)$ ), l'incertitude du processus à la sortie du processus  $\Delta m(s)$ , la référence  $r$ , l'erreur de boucle  $e$  et enfin la variable manipulée  $u$  et la sortie  $y$ . Soit  $G'(s)$  la matrice de transfert du système, tous les régimes perturbés, puis la relation suivante peut s'écrire:

$$G'(s) = [I + \Delta m(s)]G(s) \quad (3.29)$$

$\Delta m(s)$  : La valeur singulière est obtenue à partir de (3.29) :

$$\sigma_{max}([\Delta m(s)]) = \sigma_{max}([G'(s) - G(s)]G^{-1}(s)) \quad (3.30)$$

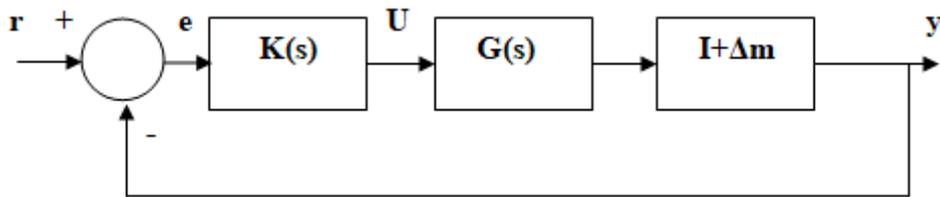


Figure 3.10. Configuration d'un système bouclé avec des perturbations multiplicatives

#### a) Condition de robustesse sur la stabilité

D'une manière intuitive, la stabilité est la propriété d'un système à revenir à sa position d'équilibre lorsqu'il en est écarté ponctuellement (Maalej, 2014); un système est considéré comme stable s'il possède de bonnes marges de stabilité (marge de gain et de phase).

L'analyse de la robustesse en stabilité consiste à établir si le système de mesure est stable malgré les variations attendues des paramètres.

$$\bar{\sigma}[S(s)]\bar{\sigma}[W_p(s)] \leq 1 \quad \forall \omega \quad (3.31)$$

$$\bar{\sigma}[T(s)]\bar{\sigma}[W_t(s)] \leq 1 \quad \forall \omega$$

La robustesse en stabilité est obtenue lorsqu'on a une bonne rejection des bruits de mesure, d'après la deuxième condition de (3.31), on doit chercher à rendre les gains principaux du processus se posés au-dessous de l'inverse des valeurs singulières maximales de la

perturbation paramétrique  $W_t(s)$ . Supposons que le système bouclé nominal  $G(s)$  (avec  $\Delta m(s)=0$ ) est stable, alors le système bouclé  $G'(s)$  est stable si l'inégalité suivante est vérifiée (Doyle J C and Stein G, 1981)

$$\bar{\sigma}[T(s)] \leq 1 / \bar{\sigma}[W_t(s)] \quad \forall \omega \quad (3.32)$$

Où  $T(s)$  est la matrice nominale de transfert en boucle fermée donnée par :

$$T(s) = G(s)K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1} \quad (3.33)$$

Et  $W_t(s)$  est une matrice de spécification de stabilité telle que:

$$\sigma_{max}[\Delta m(s)] \leq \sigma_{max}[W_t(s)] \quad (3.34)$$

Alors  $\sigma_{max}[T(s)]$ , la plus grande valeur singulière de la matrice nominale de transfert en boucle fermée est un indicateur fiable de la stabilité robuste du système bouclé, la condition de robustesse du système bouclé est alors donnée par (3.32).

***b) Conditions de robustesse sur les Performances***

La robustesse en performances est obtenue lorsqu'on a un bon suivi de la référence et une bonne rejection des perturbations pour le système nominal, d'après la première condition de (3.31), en cherchant à rendre les valeurs singulières maximales de la matrice de sensibilité se posés au-dessous de l'inverse des valeurs singulières maximales de la spécification sur les performances  $W_p(s)$ . Cet objectif peut être traduit par la condition suivante :

$$\bar{\sigma}[S(s)] \leq 1 / \bar{\sigma}[W_p(s)] \quad \forall \omega \quad (3.35)$$

Les performances sont définies soit dans le domaine fréquentiel (marges de stabilité, pulsation de coupure, facteur de surtension...etc.), l'analyse de performances d'un système soumis à des incertitudes de modèle.

Si le système respecte les spécifications de performance quelque soient les incertitudes modélisées, il est dit robuste en performance à ces incertitudes, l'analyse de la robustesse en

performance cherche à établir si le système maintient les performances prévues pour les variations attendues des paramètres.

Si la robustesse sur la stabilité est respectée, alors le régime perturbé assure les performances désirées si et seulement si :

$$\bar{\sigma}[S(s)] < \frac{1}{\bar{\sigma}[W_p(s)]} \quad \forall \omega \geq \quad (3.36)$$

Cette expression exprime la condition de robustesse sur les performances.

Où :

$W_p(s)$ : Désigne la matrice des spécifications sur les performances

Où  $S(s)$  est la matrice de sensibilité donnée par:

$$S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1} \quad (3.37)$$

En fait, la plus grande valeur singulière de la matrice de sensibilité  $\sigma_{max}(s)$  est également un indicateur de la sensibilité de la réponse du système à un changement du caractère du modèle.

En conclusion, les inégalités (3.32) et (3.35) représentent les conditions de robustesse et doivent être satisfaites pour obtenir un contrôleur robuste.

Les notions présentées précédemment permettent l'analyse de la robustesse en performance et en stabilité d'un système de matrice de transfert nominale  $G(s)$  soumis à des perturbations de type incertitudes paramétriques ou de modélisation, de déterminer le choix du régulateur  $K(s)$  et pour en faciliter aussi sa synthèse.

#### **3.5.1.2. Commande robuste multi-variable pour un canal d'irrigation**

Le but de ce travail est de synthétiser et tester un contrôleur multi-variable sur des biefs d'un canal dans le but de répondre à des spécifications précises et garantir la robustesse en boucle fermée.

Nous envisagerons une description détaillée du canal à étudier tout en dressant un bilan de toutes les grandeurs physiques impliquées dans cette commande.

Un contrôleur robuste permettant de faire face à de grandes variations dans les conditions de fonctionnement est proposé pour contrôler le niveau d'eau d'un prototype canal d'irrigation ouvert à plusieurs biefs.

L'objectif principal de l'utilisation du contrôleur est de réguler le niveau en aval du bief du canal à une valeur constante même avec des perturbations en entrée et des paramètres

dynamiques variant dans le temps. Le contrôleur robuste est conçu et testé en simulation pour différentes conditions d'écoulement du prototype canal d'irrigation ouvert à trois biefs.

La méthodologie a été utilisée pour modéliser différentes conditions d'écoulement simulées dans un canal en ouvrant et en fermant les portes amont et aval, le niveau d'eau correspondant à différentes conditions d'écoulement

L'idée de base d'une commande robuste est de concevoir un contrôleur qui assure la stabilité du régime de fonctionnement nominal et celle des régimes de fonctionnement perturbés et qui garantit également un niveau de performance satisfaisant, c'est à dire un bon temps de réponse, élimination des erreurs statiques et aucun dépassement.

### **3.5.2. Commande par la méthode du prédicteur de Smith Filtré**

L'objectif principal de cette partie est d'utiliser et développer une structure de contrôle basée sur un prédicteur de Smith filtré (FSP). Il s'agit d'une compensation de prédicteur Smith incluant un filtre de référence pour améliorer les caractéristiques de contrôle du canal principal impérial d'Aragon AIMC (Normey-Rico J.E et al., 2007). L'idée de base est d'estimer la sortie du processus non retardée à l'aide d'un modèle de processus, et d'utiliser cette estimation dans une boucle fermée de contrôle interne combinée à une boucle fermée de commande externe basée sur l'erreur d'estimation retardée. Comparant aux processus sans retard, la présence de retard dans les processus complique les aspects analytiques de la conception du système de contrôle et rend un contrôle satisfaisant plus difficile à réaliser.

#### **3.5.2.1. Le principe de la méthode du prédicteur de Smith**

Le retards pur, ou temps mort peut avoir une origine physique dû, par exemple, à la dynamique du mélange d'une réaction chimique. Ce retard peut se retrouver dans d'autres situations ; bien souvent celui-ci peut être associé à un transport de matière : un objet sur un circuit de convoyage en industrie ou transport de l'eau dans une conduite avant d'arriver au niveau du capteur comme c'est le cas des canaux d'irrigation.

Le problème principal pour contrôler les systèmes à temps mort est non seulement la baisse des performances, mais aussi l'instabilité supplémentaire possible introduite par déphasage. Les performances des systèmes de boucle fermée avec des temps morts peuvent être améliorées par l'application d'un prédicteur de correction (Normey-Ricoet J. et al., 2014).

Smith propose une technique de compensation de retard via un modèle mathématique du processus dans la mini-boucle de rétroaction autour du contrôleur conventionnel, puis utilise cette estimation dans une boucle de contrôle de rétroaction interne combinée à une boucle de commande de retour externe basée sur l'erreur d'estimation retardée (Normey-Rico J.E. et al., 2008).

En plus de l'avantage de s'adapter avec les temps de retard élevés, le prédicteur de Smith est relativement robuste et obtient un comportement en sortie encore acceptable vis-à-vis des erreurs de modélisation et des changements de paramètres nominaux du procédé.

#### 3.5.2.2. Le prédicteur de Smith et ses propriétés

Le prédicteur Smith est un contrôleur simple et efficace pour les processus à temps morts ; C'est une structure de contrôle bien connue dans l'industrie où l'idée de base est d'estimer la sortie de processus non retardée par l'utilisation d'un modèle du système et d'utiliser cette estimation dans une boucle de contrôle interne combinée à une boucle de rétroaction externe sur la base de l'erreur d'estimation retardée.

Un schéma fonctionnel de la structure du prédicteur de Smith est donné dans la figure 3.11, et peut être divisée en deux parties : le contrôleur primaire  $C(s)$  et la structure du prédicteur. Le prédicteur est composé d'un modèle du système sans temps mort ( $G_n(s)$ ), également connu dans la littérature sous le nom de modèle rapide, et d'un modèle du temps mort  $e^{-Lns}$ . Ainsi, le modèle de processus complet est  $P_n(s) = G_n(s)e^{-Lns}$ .

Le modèle rapide ( $G_n(s)$ ) est utilisé pour calculer une boucle ouverte de prédiction. Afin prendre en compte les erreurs de modélisation, la différence entre la sortie du processus et le modèle, y compris le temps mort, est ajoutée à la boucle ouverte, comme on peut le voir dans le schéma de la figure 3.11.

S'il n'y a pas d'erreurs de modélisation ou de perturbations, l'erreur entre la sortie du processus actuelle et la sortie du modèle sera nulle et le signal de sortie du prédicteur  $y_p(t)$  sera la sortie sans temps mort du système.

Dans ces conditions,  $C(s)$  peut être réglé, au moins dans le cas nominal, comme si le processus n'avait pas de temps mort. Certaines caractéristiques fondamentales du SP doivent

être analysées lorsque l'on considère une modélisation parfaite (Jerome N. F et al., 1986) c'est-à-dire quand  $P(s) = P_n(s)$ ;  $G(s) = G_n(s)$  et  $L = L_n$ .

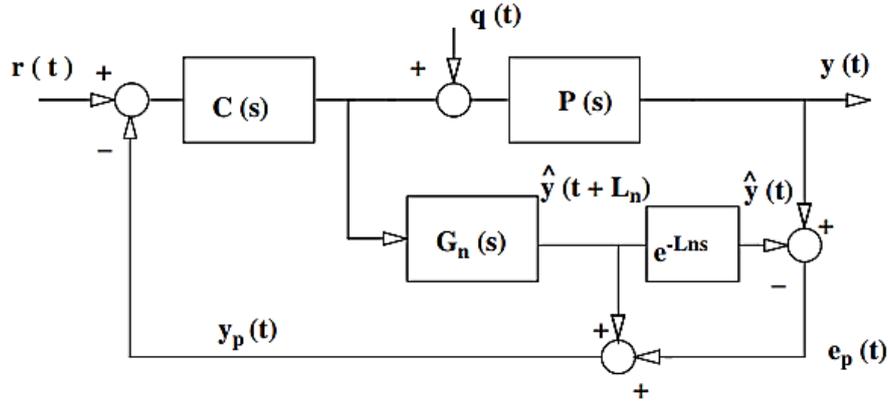


Figure 3.11. Structure de la commande par prédicteur de Smith

La figure 3.9 présente un schéma de principe de la configuration de prédicteur de Smith conventionnelle, dans laquelle  $L_n$  est le temps mort du processus,  $C(s)$  désigne le contrôleur et  $P(s)$  est le processus réel, qui est supposée être stable en boucle ouverte.

$y$  est la sortie du processus,  $y_p(t)$  : signal de référence,  $q$  la perturbation d'entrée

La fonction de transfert de l'entrée de référence  $y_{sp}$  à la sortie  $y$  du système a la forme :

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{C(s)P(s)e^{-L_n s}}{1+C(s)P(s)} \quad (3.38)$$

Comme le montre l'équation, le principal avantage du prédicteur de Smith est que la composante de retard peut être éliminée de l'équation caractéristique pour le système en boucle fermée, la fonction de transfert de la perturbation  $l$  vers la sortie  $y$  du système est donnée par :

$$\frac{Y(s)}{L(s)} = \frac{P(s)e^{-L_n s}}{1+C(s)P(s)} + \frac{C(s)P(s)e^{-L_n s}}{1+C(s)P(s)} [P(s) - G(s)e^{-L_n s}] \quad (3.39)$$

La faible capacité de rejet des perturbations du contrôle du prédicteur de Smith est évidente ; Il ne peut pas être utilisé pour contrôler des processus ayant un intégrateur car une perturbation de charge constante entraînera une erreur en régime permanent (BEGHOVICH O et al, 2007a).

Les erreurs de temps mort peuvent conduire le SP à l'instabilité. Une simple analyse du schéma de principe du SP montre que lorsque les erreurs de temps mort sont prises en

compte, les erreurs entre les sorties réelles et prévues sont renvoyées au contrôleur de manière «périodique». Notez qu'après l'application du changement du point de consigne à  $t = t_0$ , l'erreur entre la sortie réelle et la sortie prévue ( $e_p(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ ) sera nulle jusqu'à l'instant  $t = t_0 + x$  où  $x = \min(L_n, L)$ . Ce signal est ensuite renvoyé au contrôleur et sa réaction sera perçue à  $e_p(t)$  après seulement  $x$  secondes. Cette erreur peut provoquer une instabilité en boucle fermée mais, d'un autre côté, si cette erreur n'est pas renvoyée au contrôleur, les perturbations ne seront pas rejetées. Ainsi, l'effet de l'erreur d'estimation du temps mort peut être interprété comme l'addition de la réponse nominale plus une perturbation périodique avec une période approximativement égale à  $\min(L_n, L)$

Une solution simple à ce problème consiste à utiliser un filtre  $F_r(s)$  avec un gain statique unitaire ( $F_r(0) = 1$ ), comme le montre la figure 3.12. Le filtre doit être conçu pour atténuer les oscillations de la sortie du système, en particulier à la fréquence où les erreurs d'incertitude sont importantes. Dans ce cas, le filtre  $F(s)$  peut être défini comme un filtre du premier ordre avec un seul paramètre (la constante de temps  $T_f$ ) lié à  $L_n$  (Normey-Rico J.E et al., 1997).

#### 3.5.2.3. Compensation de temps mort par le Prédicteur de Smith Filtré

Le filtre inséré pour atténuer les oscillations en sortie de l'installation surtout à la fréquence où les erreurs d'incertitude sont importantes. Dans ce cas, le filtre  $F(s)$  peut être défini comme un filtre du premier ordre avec un seul paramètre (la constante de temps  $T_f$ ) lié à  $L_n$ :

Un retard se produit fréquemment dans les canaux d'irrigation, c'est un phénomène typique dans les processus réels tel que les canaux à surface libre, qui est causé par la distance entre les ressources en eau et les utilisateurs d'eau. Par rapport aux processus sans délai, la présence du retard dans les processus complique considérablement les aspects analytiques de la conception des systèmes de contrôle et rend un contrôle satisfaisant plus difficile à réaliser.

Puisque l'action dérivée établit la sensibilité aux bruits des capteurs aux systèmes à retard et n'améliore pas les performances du système de contrôle, l'approche classiquement utilisée pour régler pour un canal s'effectue par un régulateur PI.

Ces méthodes sont généralement basées sur un modèle nominal, tandis que les paramètres dynamiques des canaux varient avec le changement des conditions hydrauliques. Le principal

avantage est que le retard est éliminé de l'équation caractéristique du système en boucle fermée. Ainsi, le problème de conception du processus avec retard peut être converti en celui sans retard.

Il s'agit de l'une des méthodes de compensation des temps morts les plus populaires et de l'algorithme le plus utilisé pour la compensation des temps morts dans l'industrie (Shokri S et al, 2010). On passe par l'utilisation d'un modèle du processus pour prédire le comportement du système, et ainsi améliorer les performances du contrôleur (Holene, 2013).

La condition de stabilité robuste pour le prédictor de Smith avec filtre est :

$$\overline{\delta P}(\omega) < dP_{FSP}(\omega) = \frac{|1+C(j\omega)G_n(j\omega)|}{|C(j\omega)G_n(j\omega)F_r(j\omega)|} \quad (3.40)$$

$$\omega > 0 \text{ donc } dP_{FSP}(\omega) = \frac{dP_{sp}(\omega)}{|F_r(j\omega)|} \quad (3.41)$$

Autrement dit, si le filtre  $F_r(s)$  est un passe-bas, il peut être utilisé pour améliorer la robustesse du système dans la région de fréquence souhaitée. L'équation (3.40) montre que  $dP_{FSP}(\omega)$  peut être augmenté arbitrairement aux moyennes et hautes fréquences en utilisant un  $F_r(s)$  adéquat.

Notez que s'il n'y a pas de perturbations ( $q(t) = 0$ ), les performances nominales du système en boucle fermée ne sont pas modifiées par l'inclusion de  $F_r(s)$ . Il faut cependant noter que la perturbation nominale de la fonction de transfert en boucle fermée de sortie est modifiée par l'inclusion du filtre. En général, après l'inclusion du filtre, la réponse sera plus lente que la réponse nominale. La nouvelle fonction de transfert est :

$$\frac{Y(s)}{Q(s)} = G_n(s)e^{-Ls} \left(1 - \frac{F_r(s)C(s)G_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)}\right) e^{-Ls} \quad (3.42)$$

Donc  $F_r(s)$  produira des transitoires plus lents que ceux obtenus avec le prédictor de Smith standard. Les propriétés du FSP suggèrent la procédure générale en deux étapes suivante pour le réglage du contrôleur:

1. Calculer  $C(s)$  et  $F(s)$  afin d'obtenir les performances en boucle fermée souhaitées ;

2. Estimer la borne d'incertitude du système et calculer le filtre  $F_f(s)$  afin d'obtenir une stabilité robuste ou des performances robustes.

Ce schéma de contrôle est le plus réussi et le plus largement utilisé pour les systèmes à retard (Savonov G & Chiang R.Y, 1988). Le prédicteur de Smith a la capacité de satisfaire les caractéristiques de contrôle et est facile à calculer, donc a de meilleures performances qu'un contrôleur PID.

Ces contrôleurs conventionnels tels que PI ou PID peut ensuite être utilisé en fonction du système contrôlé. Cependant, le contrôleur complet qui comprend à la fois, le contrôleur (PI ou PID) et le modèle du système devient maintenant lui-même un système à retard (DJABRI, 2018).

$$F(s) = \frac{1}{1 + T_f s} \text{ où } T_f = \varepsilon L_n \text{ et } \varepsilon > 0 \quad (3.43)$$

Pour tenir compte des erreurs de modélisation, la différence entre la sortie du processus et le modèle, y compris le temps mort, est ajoutée à la prédiction en boucle ouverte, comme le montre le schéma de la figure 3.10. S'il n'y a pas d'erreurs de modélisation ou de perturbations, l'erreur entre la sortie actuelle du processus et la sortie du modèle sera nulle et le signal de sortie du prédicteur  $Y_p(t)$  sera la sortie sans temps mort.

Dans ces conditions,  $C(s)$  peut être réglé, au moins pour les caractéristiques nominales du SP, et doit être analysé lorsque l'on considère la modélisation parfaite c'est-à-dire lorsque  $P(s); G(s) = G_n(s)$  et  $L = L_n$  (Jerome N. F et al., 1986).

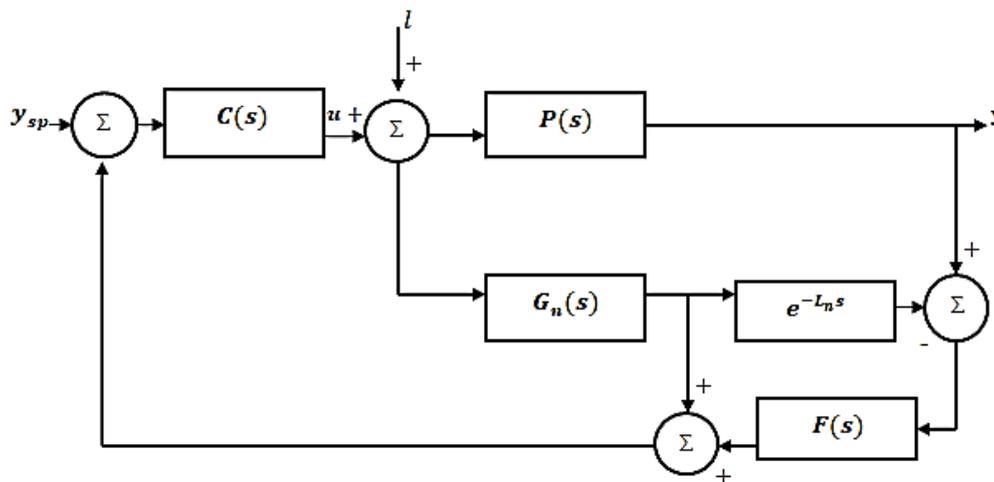


Figure 3.112. Le prédicteur de Smith Filtré

## *CHAPITRE IV : Application, Résultats et Discussions*

---

Dans ce chapitre, on aborde l'étape la plus importante qui est l'application des différentes stratégies de commande avale (amont) de niveaux de deux modèles, à savoir le canal principal impérial d'Aragon (AIMC) qui tire son eau de l'Èbre (rivière en Espagne) et les biefs dans un prototype de canal d'irrigation ouvert disponible au laboratoire de l'institut IMTA (Mexican Institute of Water Technology).

Tous les résultats de la simulation sont présentés et discuté dans ce chapitre.

## 4.1. Commande du canal principal impérial d'Aragon (AIMC)

Le modèle du canal est décrit dans le paragraphe 2.5.1 et es résultats présentés dans la section suivante ont été obtenus pour simulation le utilisant logiciel Matlab. L'idée ici est d'appliquer les stratégies de commande par la méthode des gains principaux à celle utilisant le prédicteur de Smith filtré, puis comparer les résultats obtenus.

### 4.1.1. La commande robuste par méthode des gains principaux

Les modèles pour quatre conditions de fonctionnement différentes des conditions nominales (régimes perturbés) ont été obtenus expérimentalement et validées par identification des réponses indicielles ; Ils ont pour expressions :

$$G_1(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{0.01}{(1 + 500s)(1 + 300s)} e^{-360s}$$

$$G_2(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{0.01}{(1 + 15000s)(1 + 300s)} e^{-360s}$$

$$G_3(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{0.07}{(1 + 500s)(1 + 300s)} e^{-360s}$$

$$G_4(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{0.06}{(1 + 1500s)(1 + 300s)} e^{-360s}$$

#### ❖ Évaluation des incertitudes multiplicatives $\Delta m(s)$

Les plus grandes valeurs singulières des incertitudes multiplicatives  $\Delta m(s)$  sont déterminées à partir de l'équation (3.30). Ces variations des paramètres du modèle sont causées par les facteurs suivants: les variations du régime de rejet à travers les portes en amont dans la plage de fonctionnement, provoquant des changements dans le volume de stockage des biefs entre le volume de rejet nul et le volume de rejet maximal dans les niveaux d'eau en aval et dans la propagation du flux.

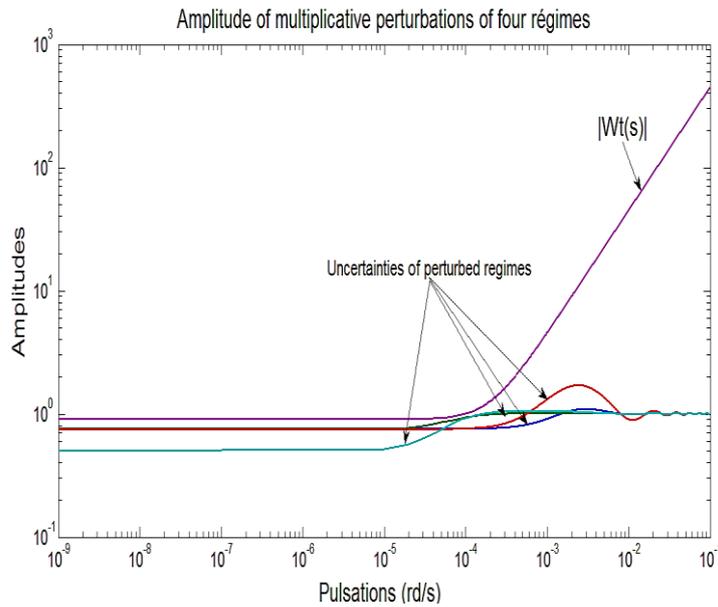
Le résultat est donné sur la figure (4.1), où il est vérifié que les valeurs singulières maximales de ces incertitudes sont inférieures à 1 aux basses fréquences et augmentent en hautes fréquences.

❖ Les conditions de robustesse

A partir des résultats obtenus (Figure 4.1) et en utilisant (3.34), la spécification sur la stabilité  $W_t(s)$  est représentée comme suit:

$$W_t(s) = 0.9(1 + 5000s) \quad (4.1)$$

Ensuite, la condition de robustesse sur la stabilité est donnée par l'inégalité (3.32).



**Figure 4.1.** Incertitudes multiplicatives  $\Delta m(s)$

Les spécifications sur les performances pour tous les régimes perturbés possibles sont définies de telle sorte que ces régimes ont le même temps de réponse que le régime nominal. La spécification sur les performances  $W_p(s)$  est alors donnée par :

$$W_p = \frac{(1 + 30000 s)}{30000 s} \quad (4.2)$$

La condition pour une performance robuste est donnée par (3.35). Enfin, les conditions de robustesse des principaux canaux d'irrigation sont représentées sur la figure (4.2):

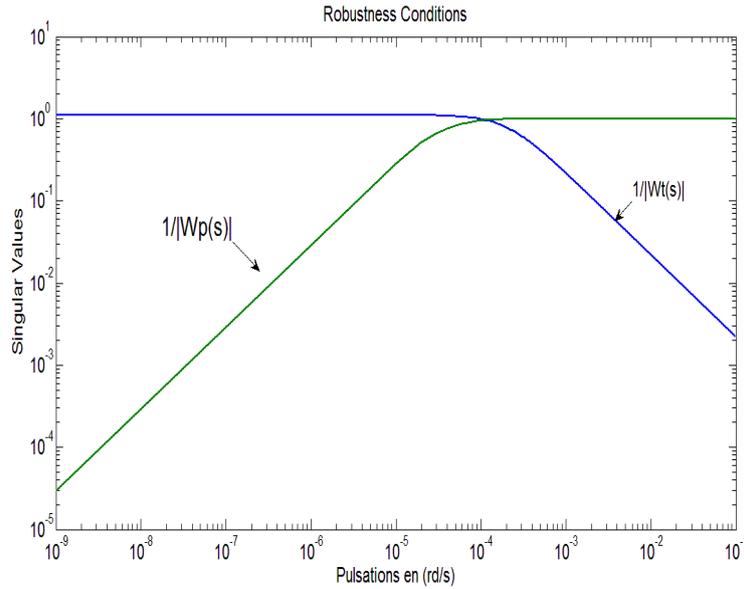


Figure 4.2. Les conditions de robustesse

La méthode des gains principaux consiste à trouver un contrôleur  $K(s)$  donné par l'équation (3.27), telle que l'équation (3.28) soit satisfaite et les conditions de robustesse données par (3.32) et (3.35) pour la stabilité et les performances sont également vérifiées.

Un modèle simplifié du régime nominal utilisé dans la conception est défini par :

$$G_{sn} = \frac{0.0401}{(1 + 880.79s)(1 + 81.27s)} \quad (4.3)$$

Le contrôleur est obtenu comme suit :

$$K1 = G^{-1}(0) = \frac{1}{0.0401} \quad K2(s) = \frac{1}{s} \quad K3 = 0,0011 \quad K4(s) = 1 + \alpha s + \beta s^2$$

La valeur du coefficient  $K3$  est obtenue par simulation.

La structure  $K4(s)$  est choisie de tel façon  $\alpha$  et  $\beta$  sont déterminés par la minimisation du critère (3.28), c.à.d :

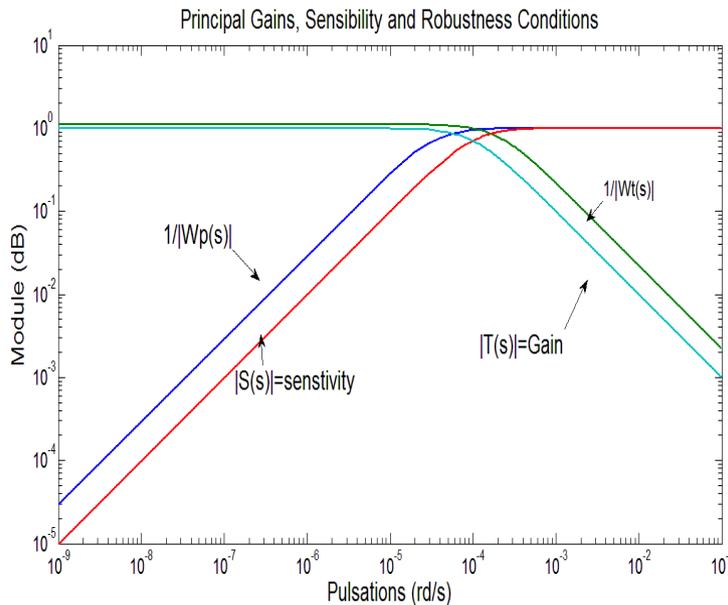
$$\alpha = 962.06 ; \beta = 71581.80$$

Le contrôleur final est alors donné par :

$$K(s) = 0.0274 \frac{(1 + 962.06s + 71581.80s^2)}{s} \quad (4.4)$$

#### 4.1.1.1. Les résultats dans le domaine fréquentiel

Les résultats fréquentiels sont représentés dans la figure (4.3). Il est montré que les conditions de robustesse ne sont pas violées, on constate que la condition de robustesse sur la stabilité est respectée : les gains principaux du transfert  $T(s)$  sont au dessous de la valeur singulière maximale, indicateur fiable de la stabilité robuste du système bouclé. La condition de robustesse sur les performances est donc satisfaite : les valeurs singulières de la stabilité  $S(s)$  sont au dessous de la valeur singulière maximale, car la stabilité est garantie si la plus grande valeur singulière de la fonction de matrice de transfert en boucle fermée  $\sigma_{max}[(T(s))]$  est inférieure à la borne supérieure de la plus grande valeur singulière d'incertitudes du modèle  $\sigma_{max}[(W_t(s))]^{-1}$ . La même idée est utilisée pour le critère de performance robuste  $q$ .



**Figure 4.3.** Résultat fréquentiel : Condition de robustesse sur la stabilité et sur les performances

Les résultats dans le domaine temporel sont représentés sur la figure (4.4). Des simulations ont été effectuées en utilisant l'approximation de Padé suivante pour le retard pur :  $e^{-360s} = \frac{(1-180s)}{(1+180s)}$  où la période d'échantillonnage est fixée à  $T = 60s$ . On observe la stabilité de tous les régimes, une bonne performance et un temps de réponse rapide avec le contrôleur de gains principaux (PG). Il est à noter que nos résultats obtenus sont très encourageants

comparativement aux contrôleurs PI et PID rapportés par les auteurs dans (Feliu-Batle V et al, 2011).

#### 4.1.1.2. Résultats dans le domaine temporel

Afin de confirmer les résultats précédents, des simulations ont été effectuées dans le plan temporel afin de visualiser et comparer les réponses temporelles du système bouclé par les régulateurs classiques PI, PID et le contrôleur robuste par gains principaux, PG.

Les figures suivantes illustrent ces réponses indicielles du niveau d'eau du régime nominal et des régimes perturbés du canal d'irrigation.

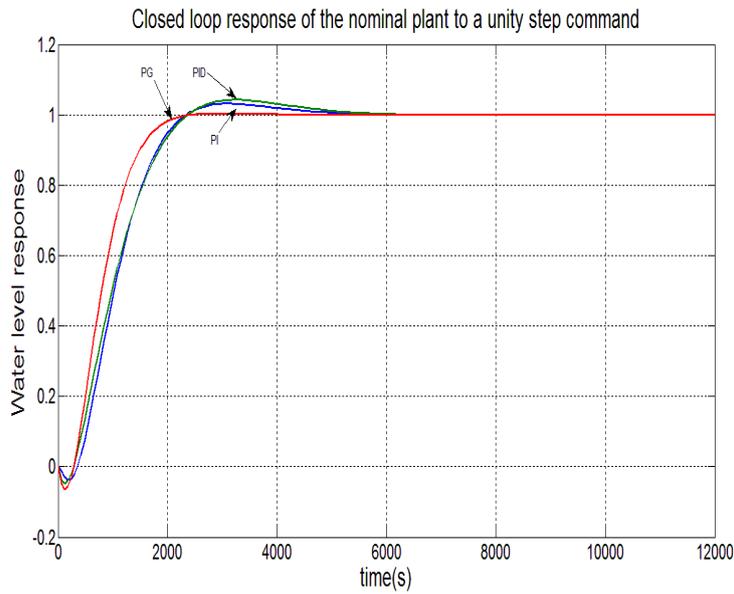


Figure (a) Réponse en boucle fermée du modèle nominal

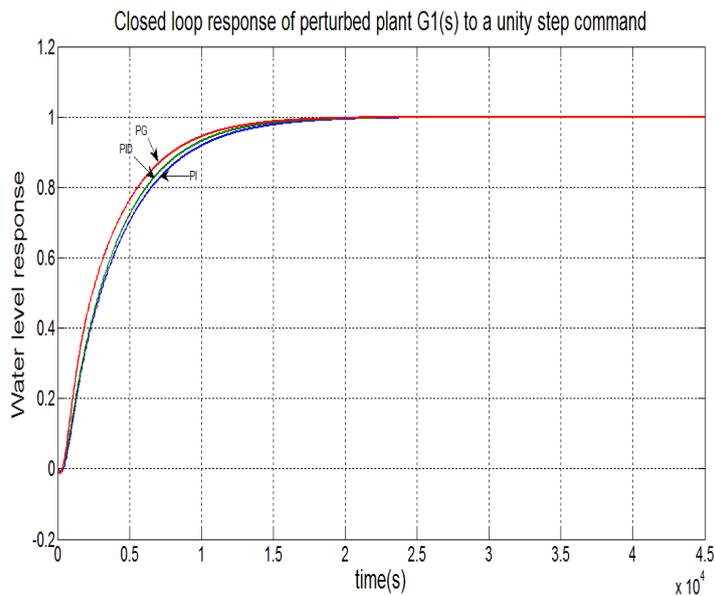
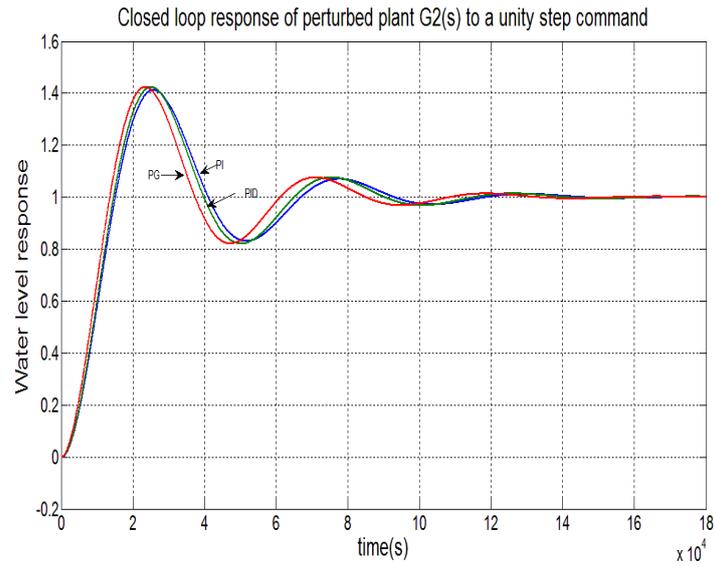
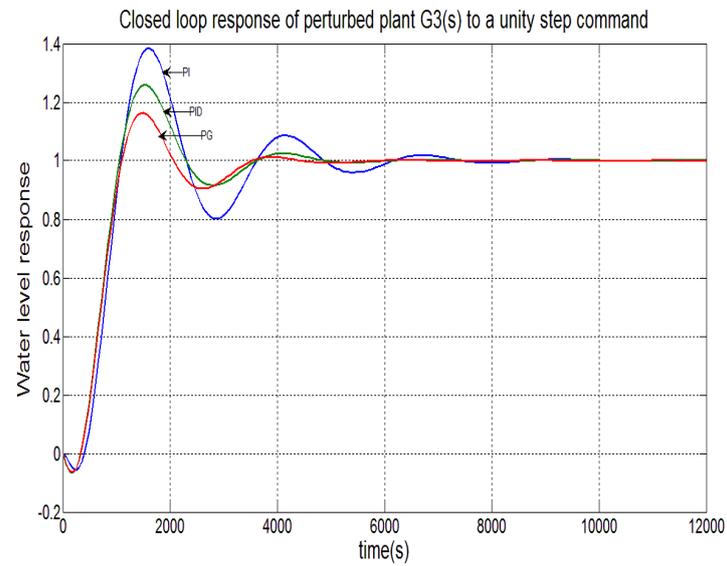


Figure (b) Réponse en boucle fermée du modèle perturbé  $G_1(s)$ , avec  $k=0.01$ : ( $T_1=500$ ,  $T_2=300$ ,  $\tau=360$ )

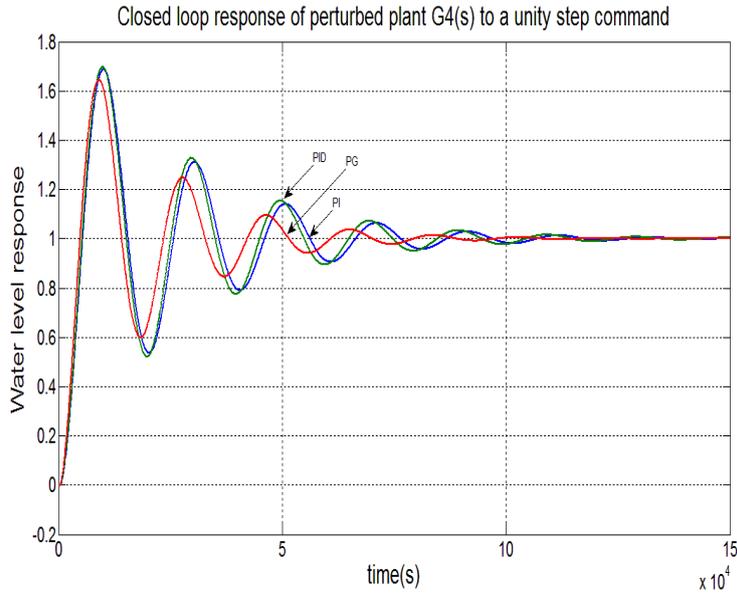
## Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions



**Figure (c)** Réponses en boucle fermée des régimes perturbés  $G_2(s)$ , avec  $k=0.01$ : ( $T_1=15000$ ,  $T_2=300$ ,  $\tau=360$ ).



**Figure (d)** Réponses en boucle fermée des régimes perturbés  $G_3(s)$  avec  $k=0.07$ : ( $T_1=500$ ,  $T_2=300$ ,  $\tau=360$ ).



**Figure (e)** Réponses en boucle fermée des régimes perturbés  $G_4(s)$ , avec  $k=0.06$  : ( $T_1=15000$ ,  $T_2=300$ ,  $\tau=360$ ).

**Figure 4.4.** (a)(b)(c)(d)(e) Réponses indicielles du régime nominal et des régimes perturbés du canal d'irrigation.

Dans cette partie, une commande robuste par les gains principaux, permettant de bénéficier de la rétroaction face aux incertitudes, a été étudiée et appliquée avec succès au bief du canal d'irrigation principal présenté avant.

D'après ces figures, il est clair de que le contrôleur robuste synthétisé par la méthode des gains principaux à la capacité de fournir la meilleure dynamique donnant lieu à des résultats très encourageants. Ceci prouve bien que les modèles orientés contrôle facilitent la conception de contrôleurs robustes et performants, qui permettent d'augmenter l'opérabilité et l'efficacité des biefs du principal canal d'irrigation et d'améliorer le service aux utilisateurs.

#### 4.1.2. Commande par Prédicteur de Smith filtré

Le comportement dynamique du bief du canal peut être représenté par le même modèle utilisé précédemment, à savoir un second ordre avec un retard pur, c'est-à-dire :

$$G(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{0.0401}{(1 + 880.79s)(1 + 81.27s)} e^{-360s} \quad (4.5)$$

Mais de grandes variations dans les paramètres du modèle sont obtenues lorsque les régimes de décharge changent dans la plage de fonctionnement ( $Q_{min}, Q_{max}$ ), suivant les intervalles suivants (Feliu-Batlle V et al, 2008):

$$0.01 \leq K(t) \leq 0.1$$

$$500 \leq T1(t) \leq 15000$$

$$10 \leq T2(t) \leq 300$$

$$300 \leq \tau(t) \leq 360$$

### 4.1.2.1. Discussion des résultats obtenus

Le système de contrôle du bief du canal principal d'irrigation donné est considéré où quatre contrôleurs seront conçus dans cette section. Ce sont : un PI, un PID, une structure de Prédicteur Smith notée SP (Smith Predictor) et une modification de cette dernière incluant un filtre notée FSP pour Filtered Smith Predictor.

La réponse temporelle nominale fournie par le contrôleur doit respecter un compromis entre de bonnes performances dans le domaine temporel (temps de stabilisation  $t_s$  dans la bande  $\pm 5\%$ , dépassement  $M_p$ , erreur d'état stable  $e_{ss}$ ) et un effort de commande acceptable, c'est-à-dire l'amplitude maximale du signal de commande doit être limitée.

Leur comportement sera comparé, et il sera démontré que le prédicteur Smith et sa version filtrée - s'ils sont correctement conçus - atteignent des performances plus robustes que le PI et le PID. Une attention particulière sera accordée à la robustesse de la non-concordance du modèle et à l'amélioration du rejet des perturbations.

#### ❖ Conception des contrôleurs PI, PID et SP pour le Bocal

Notre objectif est de concevoir des contrôleurs qui garantissent autant que possible la réduction du temps de réponse dans le système en boucle fermée correspondant, en gardant à l'esprit que le temps de stabilisation en boucle ouverte du système nominale est de  $t_{s_0} \approx 3000s$ . On souhaite réduire ce temps de réponse avec la contrainte d'une marge de phase  $\varphi_m \geq 60^\circ$  pour le procédé nominale (afin de garantir un fort amortissement ou, de manière équivalente, un dépassement inférieur à 10%).

Dans le tableau suivant on présente le temps de réponse  $t_s$ , le dépassement  $M_p$ ; la fréquence de coupure  $\omega_c$  et la marge de phase  $\phi_m$  du système nominale pour chaque contrôleur. De

#### Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions

plus, la fréquence de coupure de phase  $\omega_g$ , la marge de gain  $Mg$  et l'effort de commande maximum, ECM.

Avec ses trois paramètres, les contrôleurs PI, PID et SP doit être réglé pour accomplir une bonne performance soumise à la même contrainte de la marge de phase et minimisant le temps de stabilisation. Par rapport à la contrainte précédente, Le tableau suivant montre les résultats obtenus pour chaque contrôleur :

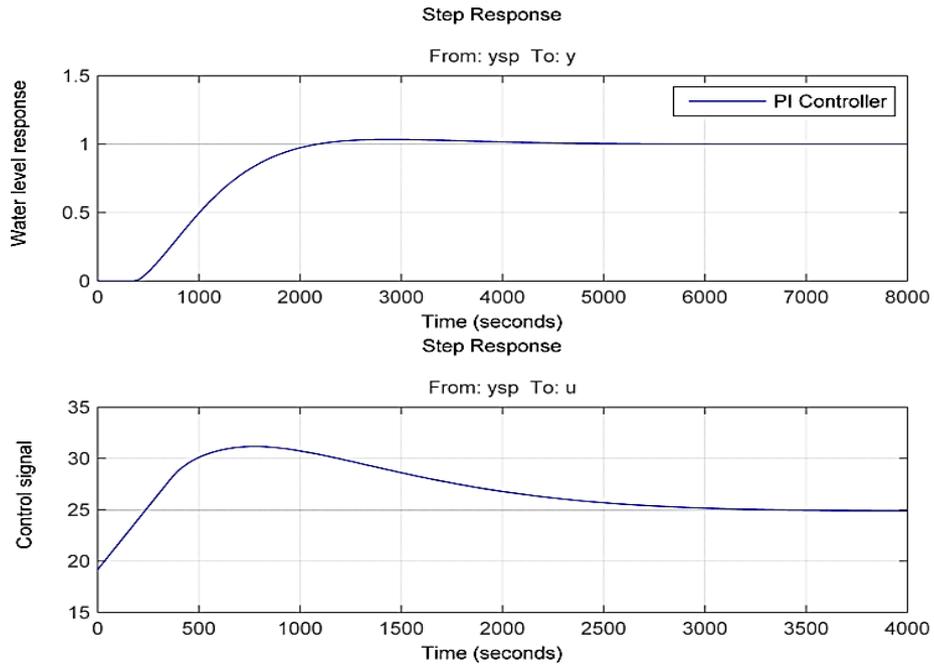
Contrôleur	$t_s$ (s)	$Mp$ (%)	$\omega_c$ [rad/s]	$\omega_g$ [rad/s]	$\varphi_m$ (°)	$Mg$	ECM
PI	1890	3.38	0.000937	0.00349	63	12.3	31.2
PID	2220	1.92	0.000775	0.00231	65.7	10	30.8
SP	1500	3.62	2.05e-11	0.00359	180	7.19	36.9

**Tableau 4.1.** Résultats des performances obtenues

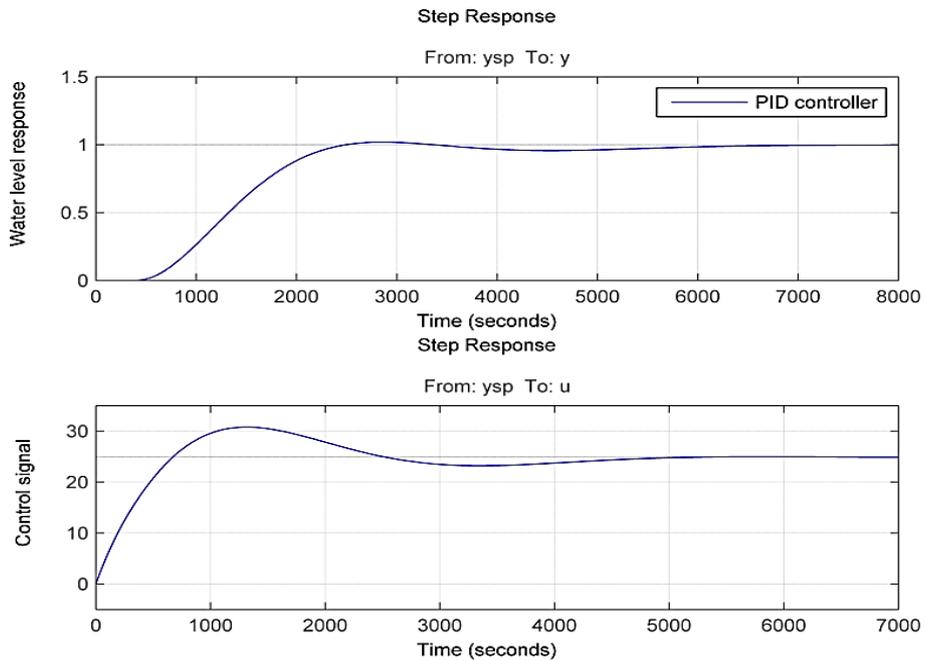
PI	$C_{PI} = 19.1493 + 0.02451 \frac{1}{s}$
PID	$C_{PID} = 16.1009 + 0.0172 \frac{1}{s} - 5694.9453 \frac{0.00283}{1 + 0.00283 \frac{1}{s}}$
SP	$C_{SP} = 32.2569 + 0.05544 \frac{1}{s}$

**Tableau 4.2.** Paramètres des contrôleurs résultant

## Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions

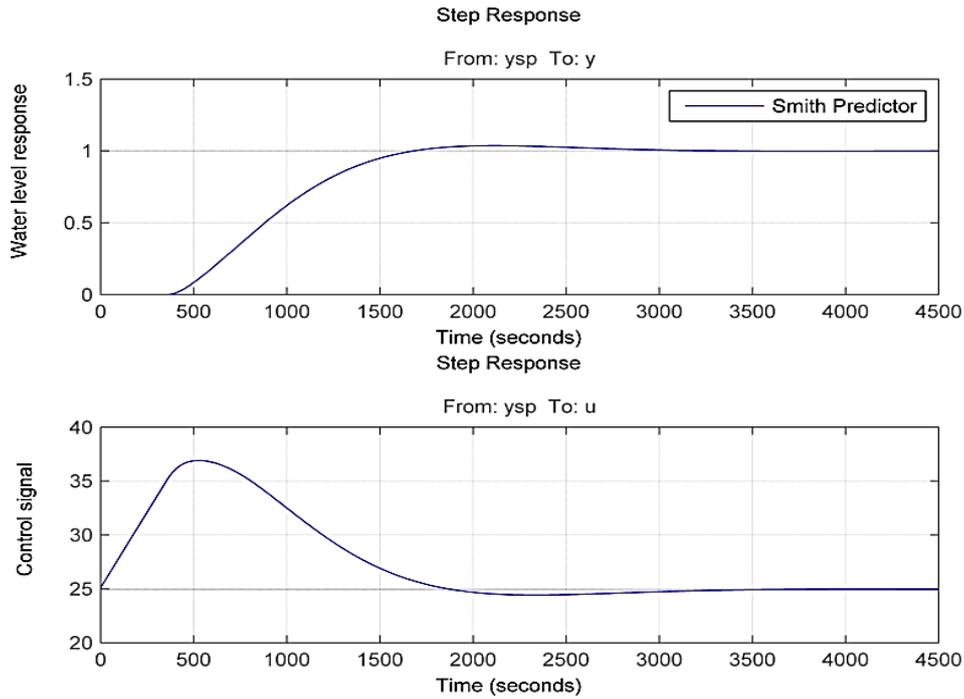


**Figure 4.5.** Réponse en boucle fermée par contrôleur PI

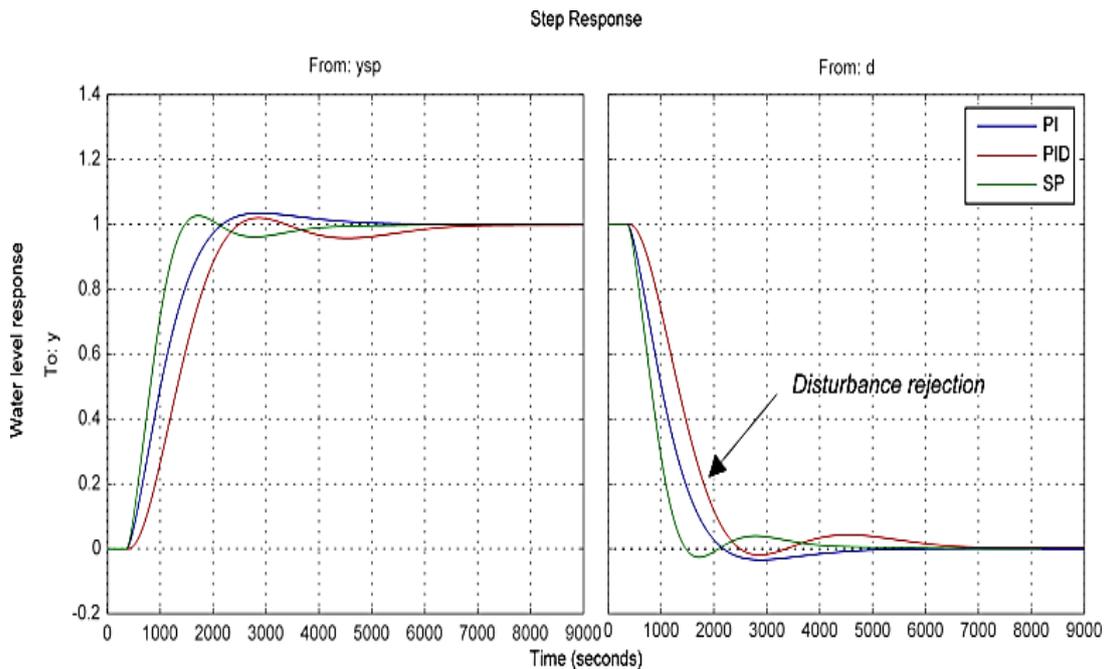


**Figure 4.6.** Réponse en boucle fermée par contrôleur PID

## Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions



*Figure 4.7. Réponse en boucle fermée par contrôleur SP*

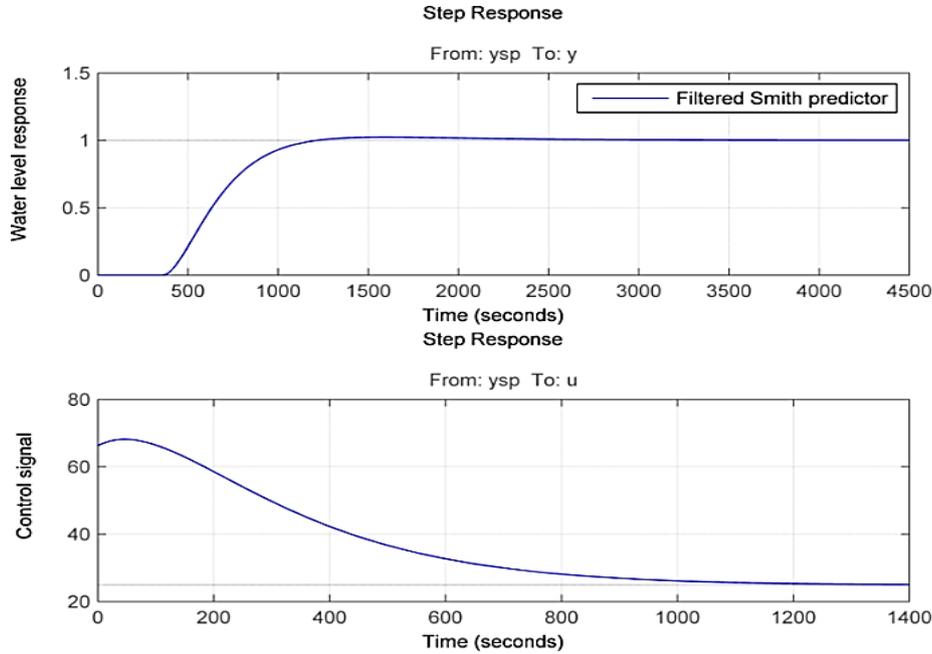


*Figure 4.8. Comparaison des rejets de perturbations*

Le Prédicteur de Smith fournit une réponse beaucoup plus rapide avec une plus grande valeur de l'effort de commande maximum. De plus, nous pouvons voir (4.8) que le rejet de perturbation du SP est supérieur. Les incertitudes sur le modèle existent toujours, en outre, du point de vue pratique, les erreurs de modélisation doivent être prises en compte. Par exemple, des erreurs de temps mort peuvent entraîner l'instabilité du régulateur SP.

## Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions

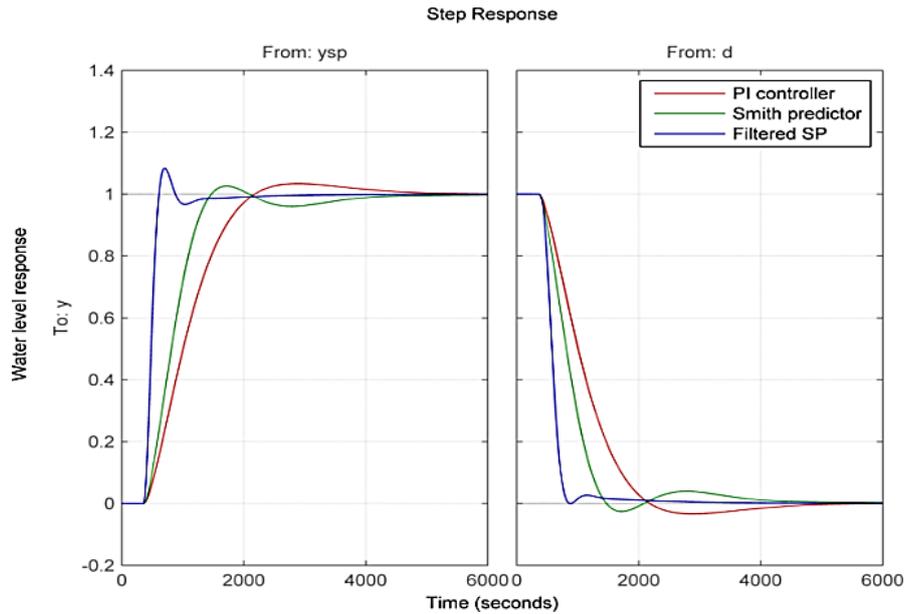
Choisissons la version filtrée du régulateur SP pour faire face à ce problème. La constante  $T_f$  peut être choisie comme  $T_f = 0.5l_n$  (c.à.d.  $\varepsilon = 0,5$ ). Ce choix donne une bonne solution pour les erreurs de temps mort jusqu'à 30% (Normey-Rico J.E et al., 2007). Les performances du prédicteur Smith filtré sont illustrées à la figure (4.9) :



**Figure 4.9.** Réponse en boucle fermée par contrôleur FSP du niveau d'eau

Ce contrôleur garantit un temps de stabilisation  $t_s \approx 1040s$ , un dépassement  $M_p \approx 2.35\%$ , une fréquence de coupure  $\omega_c \approx 0.00116$  [rad/s] et une marge de phase  $\phi_m = 136^\circ$  pour le système nominal. De plus, la fréquence de transition de phase est  $\omega_g \approx 0.0048$  [rad/s], et la marge de gain  $Mg = 4.11$ , mais présente un signal de commande avec une valeur maximale à 68.1.

Un autre avantage de ce contrôleur est son rejet plus rapide des perturbations (figure 4.10). Nous pouvons apprécier la bande passante plus élevée du prédicteur Smith filtré (figure 4.12).



**Figure 4.10.** Supériorité du régulateur FSP en termes de rejet de perturbations

A partir de ces données, on peut voir que le régulateur FSP conçu en considérant le modèle du système utilisé pour la simulation a une meilleure réponse au prix d'un effort de commande plus important, mais qui reste dans la limite admissible.

Dans les situations pratiques, le modèle interne  $G_n e^{-Lns}$  n'est qu'une approximation de la véritable dynamique du processus, il est donc important de comprendre la robustesse du FSP à l'incertitude sur la dynamique du processus et le temps mort. Dans des situations pratiques, le modèle interne n'est qu'une approximation de la véritable dynamique du processus. Considérons donc deux modèles perturbés représentatifs de la plage d'incertitude sur les paramètres du processus:

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{0.03}{(1 + 870s)(1 + 75s)} e^{-370s} \\ G_2(s) = \frac{0.05}{(1 + 890s)(1 + 85s)} e^{-370s} \end{cases} \quad (4.6)$$

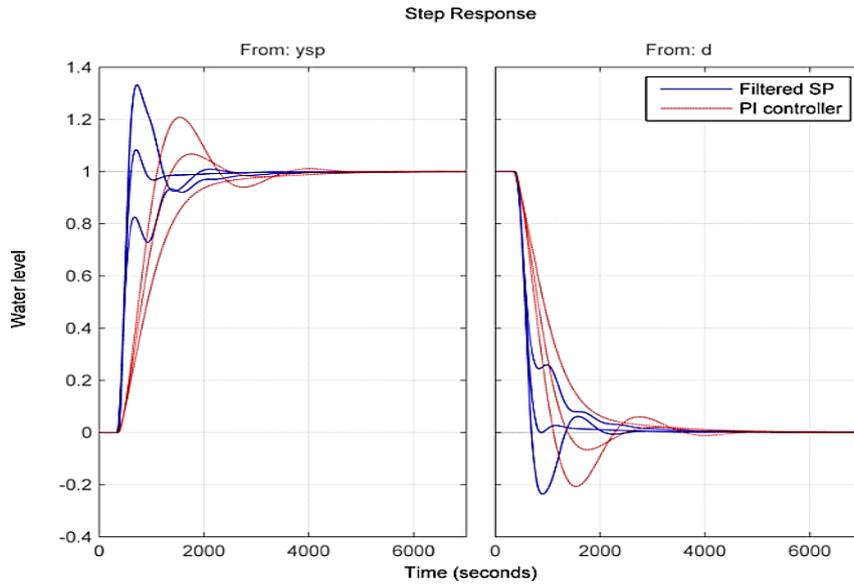


Figure 4.11. Réponse en boucle fermée des modèles nominales et perturbées

#### 4.1.2.2. Réponses dans le domaine fréquentiel

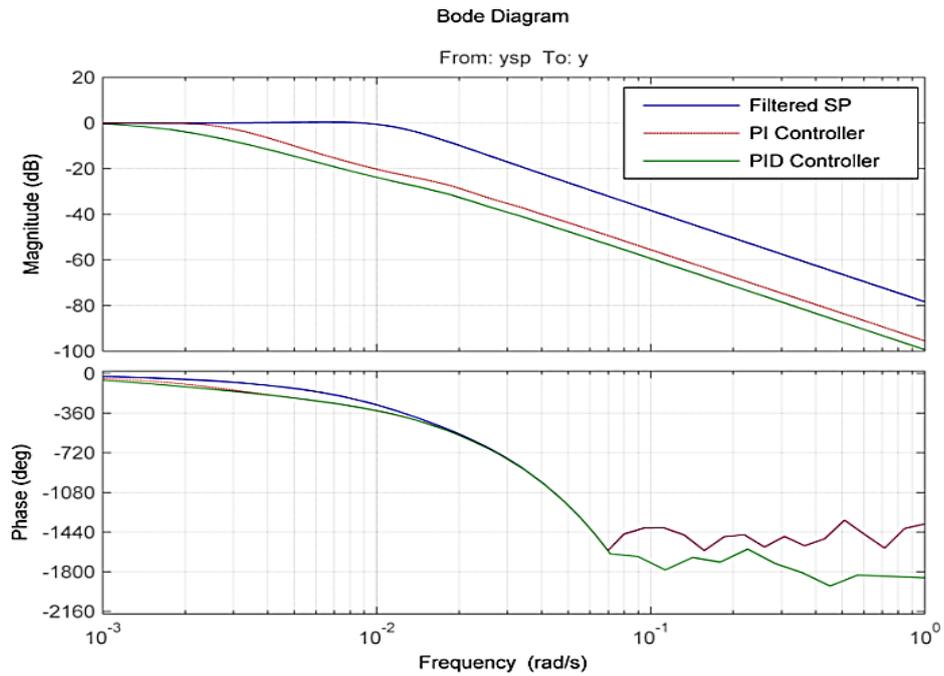


Figure 4.12. Diagramme de Bode montrant la plus grande bande passante du FSP

Il est évident que le contrôleur PI est bien meilleur que le PID. Donc, si nous comparons les conceptions PI et FSP nous pouvons percevoir qu'ils ne sont pas très sensibles à la disparité des modèles, comme le confirment les diagrammes de Bode en boucle fermée. Il est à noter l'avantage évident des régulateur FSP (figure 4.11 et figure 4.13). Il est bien connu que ce compensateur de temps mort FSP peut être instable quand une petite disparité dans le temps mort est considérée, même avec de bonnes valeurs de marge de gain et de marge de phase. Cela prouve que le régulateur principal FSP obtenu est correctement réglé.

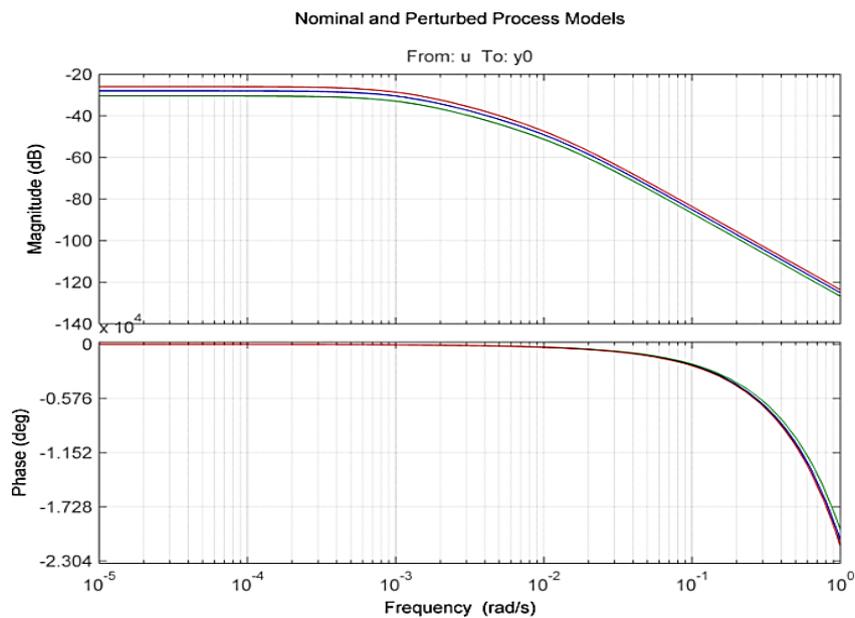


Figure 4.13. Diagramme de Bode des systèmes : nominal et perturbés

### 4.2. Commande du prototype de canal d'irrigation l'institut IMTA :

Cette partie fait l'objet de la synthèse des commandes robuste par méthode des gains principaux pour le prototype de canal d'irrigation l'institut IMTA. Pour cela, nous avons choisi un système dont les caractéristiques sont intéressantes pour pouvoir expérimenter ce type de commande.

On commencera par faire une analyse du comportement du processus et ensuite on entamera la synthèse de contrôleurs robustes, le contrôleur obtenu sera appliqué sur le régime perturbé afin de comparer les résultats avec ceux des modèles normales et juger sur leur robustesse.

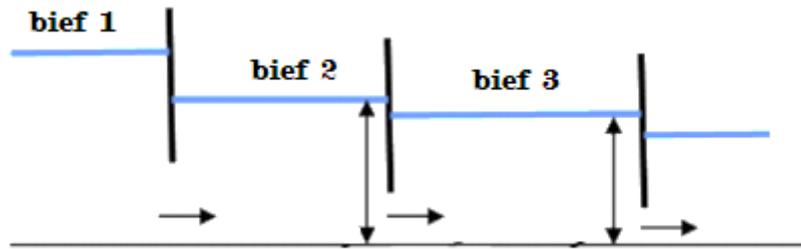


Figure 4.14. Schéma simplifié du canal à trois biefs

#### 4.2.1. Modèles Proposés

Des modèles d'entrées-sorties linéaires (E / S) pour la conception du contrôleur sont dérivés (Sanchez L et al, 2007). Cette procédure consiste à identifier trois matrices de transfert, une pour chaque point de consigne comme indiqué dans le tableau 4.3.

Référence i	Débit Q (l/s)	Ouverture Vanne $u_1, u_2, u_3$	Niveau 1 $y_1$	Niveau 2 $y_2$	Niveau 3 $y_3$
1	80	20	70.7	63.5	53.5
2	65	14.7	70.7	63.5	57.5
3	50	10.9	70.7	63.5	57.5

Tableau 4.3. Différents points de fonctionnement

Les modèles proposés sont donnés par:

$$\begin{aligned}
 H_1(s) &= \begin{bmatrix} \frac{0.85}{48s + 1} & \frac{0.625}{168s + 1} & \frac{4.2}{3890s^2 + 399s + 1} \\ 0 & \frac{0.70}{149s + 1} & \frac{4.675}{365s + 1} \\ 0 & 0 & \frac{5.12}{326s + 1} \end{bmatrix} \\
 H_2(s) &= \begin{bmatrix} \frac{1.21}{72s + 1} & \frac{0.862}{245s + 1} & \frac{6.806}{5420s^2 + 552s + 1} \\ 0 & \frac{0.93}{216s + 1} & \frac{7.064}{514s + 1} \\ 0 & 0 & \frac{7.42}{462s + 1} \end{bmatrix} \\
 H_3(s) &= \begin{bmatrix} \frac{2.04}{84s + 1} & \frac{1.762}{348s + 1} & \frac{10.609}{7150s^2 + 725s + 1} \\ 0 & \frac{1.81}{360s + 1} & \frac{10.739}{691s + 1} \\ 0 & 0 & \frac{10.83}{653s + 1} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Les modèles obtenus sont globalement satisfaisants, représentatifs des données expérimentales et suffisamment riches pour permettre d'évaluer correctement la méthode de synthèse de commande que nous développerons.

A partir de ces trois modèles, nous présentons les principaux gains de trois différentes conditions d'écoulement.

On commence par illustrer les résultats fréquentiels de l'application du contrôleur  $K(s)$  sur le procédé hydraulique en boucle fermée. On représente les valeurs singulières de la sensibilité  $S(s)$  et du transfert  $T(s)$ , ainsi que les conditions de robustesse sur la stabilité et sur les performances.

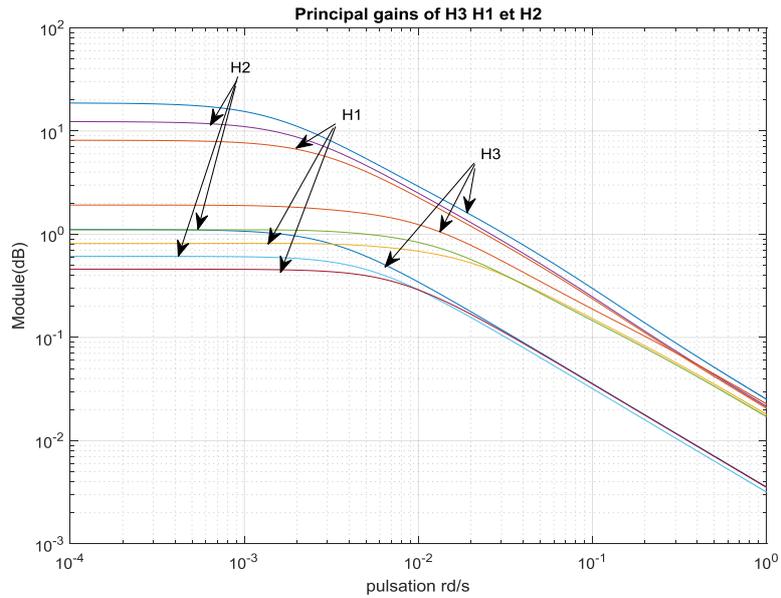


Figure 4.15. Les gains principaux

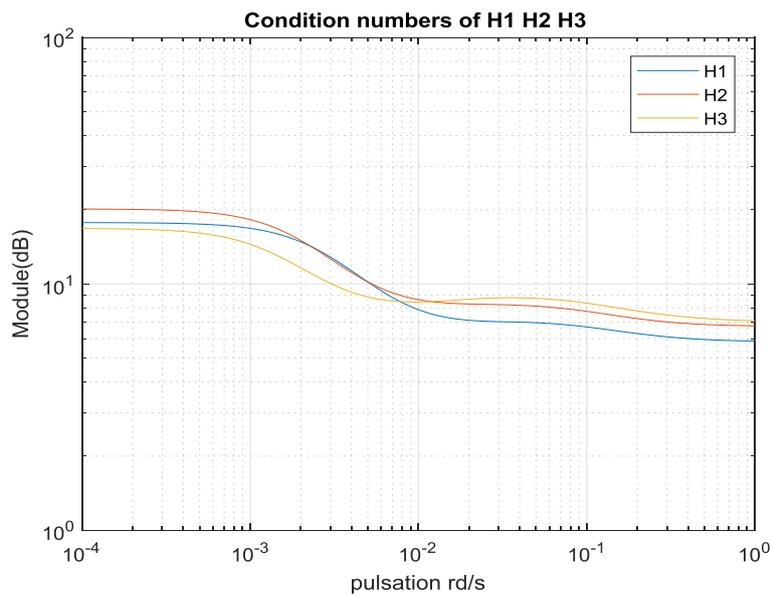


Figure 4.16. Le conditionnement

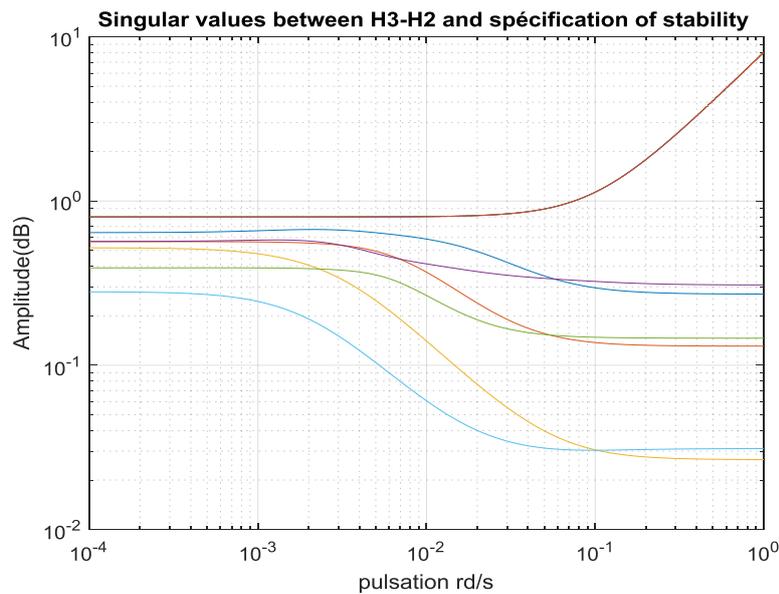
Le modèle «H3» est considéré comme un modèle nominal ou modèle de synthèse et H1, H2 comme des régimes de fonctionnement perturbés ; les valeurs singulières des perturbations multiplicatives en sortie sont données sur la figure (4.17).

Nous pouvons observer que dans les basses fréquences, ces erreurs ne dépassent pas les 100% en dessous de 0 dB, nous pouvons donc synthétiser un contrôleur robuste.

▪ **Représentation fréquentielle des valeurs singulières**

Le lieu des valeurs singulières maximales de la matrice de sensibilité directe permet de définir les performances nominales du système bouclé. Autrement dit, cette matrice de sensibilité peut fournir, dans le plan fréquentiel, les informations sur l'effet des incertitudes de modélisation sur le système corrigé ainsi que celles des erreurs de poursuite en régime permanent. En revanche, le tracé des valeurs singulières maximales de la matrice de sensibilité complémentaire peut fournir l'information sur la robustesse de stabilité en tenant compte de la dynamique négligée en hautes fréquences ainsi que l'effet des bruits de mesure.

Le gabarit fréquentiel ci-dessus illustre, les valeurs singulières du processus ; en fait, la figure (4.17) montre les valeurs singulières de la perturbation maximale. Nous avons choisi les spécifications de performance de telle manière que les réponses temporelles en boucle fermée soient égales aux réponses temporelles en boucle ouverte et aient une erreur statique nulle et aucun dépassement ; ils sont donnés par la figure suivante :



**Figure 4.17.** Valeurs singulières

A partir de cette figure, nous pouvons proposer la spécification sur la stabilité et sur les performances.

▪ **Vérification des conditions de robustesse sur la stabilité et sur les performances :**

On rappelle que les conditions de robustesse sont données par

— Condition sur la stabilité :

$$\bar{\sigma}[T(s)] < \frac{1}{\bar{\sigma}[w_t(s)]}$$

— Condition sur les performances :

$$\bar{\sigma}[S(s)] < \frac{1}{\bar{\sigma}[w_p(s)]}$$

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures (4.16) et (4.17). Les valeurs singulières maximales de la matrice de transfert en boucle fermée sont comparées aux valeurs singulières maximales de la spécification sur la stabilité et les valeurs singulières maximales de la sensibilité sont comparées aux valeurs singulières maximales de la spécification sur les performances afin de vérifier que les conditions de robustesse sont satisfaisantes.

Le choix des spécifications sur la stabilité et les performances se fait comme nous l'avons défini au troisième chapitre, pour assurer la robustesse du processus soumis à des incertitudes paramétriques, ainsi on obtient notre choix de la forme suivante :

$$W_t = \begin{pmatrix} 0.8(1 + 10s) & 0 & 0 \\ 0 & 0.8(1 + 10s) & 0 \\ 0 & 0 & 0.8(1 + 10s) \end{pmatrix}$$

$$W_p = \begin{pmatrix} \frac{1 + 84s}{84s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1 + 360s}{360s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 + 653s}{653s} \end{pmatrix}$$

Où  $W_t$  est la spécification sur la stabilité

$W_p$  est la spécification sur les performances

Les valeurs singulières maximales de la spécification sur la stabilité et sur les performances  $W_p(s)$ ,  $W_t(s)$  sont données par le gabarit fréquentiel représenté ci-dessous:

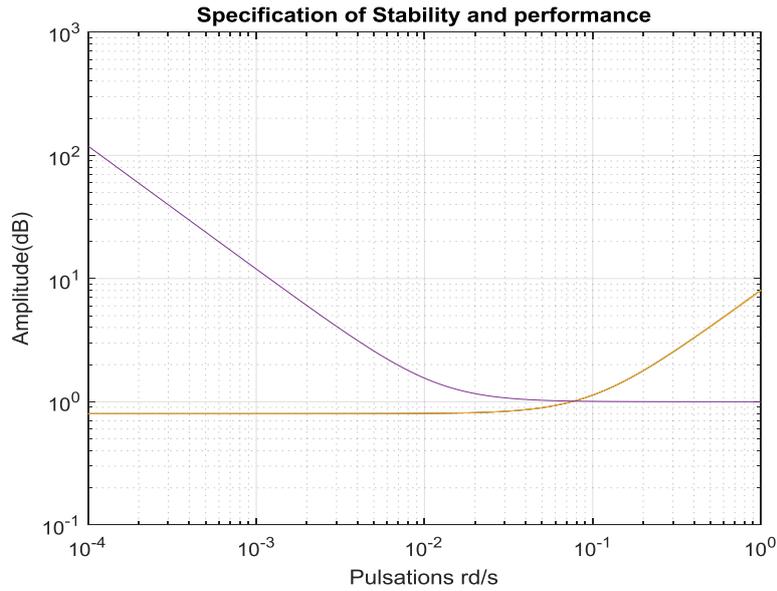


Figure 4.18. Les valeurs singulières maximales

▪ Condition de robustesse sur la stabilité et les performances

Les conditions de robustesse pour la stabilité et les performances sont données par (3.35) et (3.32). Ils sont représentés sur la figure (4.19).

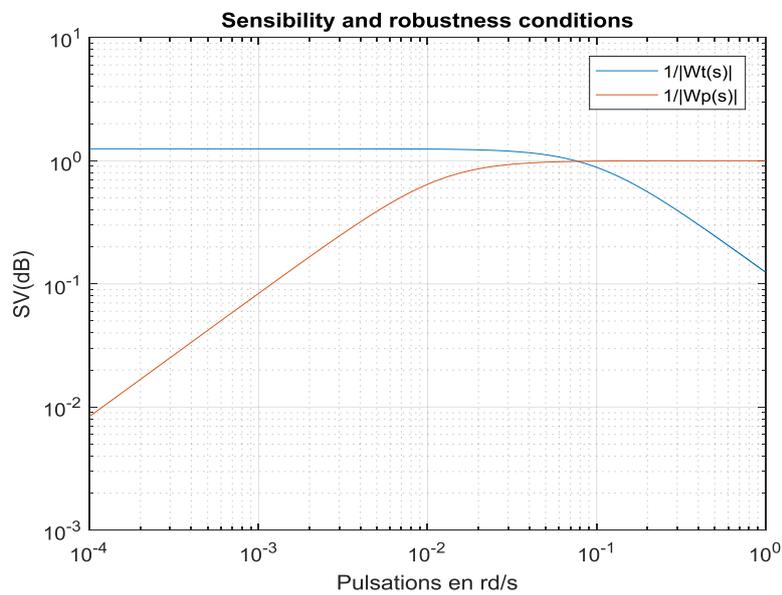


Figure 4.19. Les conditions de robustesse

En fait, la plus grande valeur singulière de la matrice de sensibilité  $\sigma_{max}(s)$  est également un indicateur de la sensibilité de la réponse du système à un changement sur les caractéristiques du modèle.

En conclusion, les inégalités (3.32) et (3.35) représentent les conditions de robustesse et doivent être satisfaites pour obtenir un contrôleur robuste.

La condition pour une performance robuste est donnée par l'équation (3.36) et les conditions de robustesse pour les principaux biefs du canal d'irrigation sont représentées sur la figure (4.20).

Nous sommes en mesure d'effectuer la synthèse du contrôleur robuste et de déterminer la loi de commande qui permettra de maintenir la stabilité du système en boucle fermée et d'ajuster les performances afin d'améliorer son comportement. Ces conditions de robustesse ne doivent pas être violées par le gain principal maximal et la sensibilité maximale.

### 4.2.2. Conception du contrôle robuste

#### ▪ Principe de la méthode

La méthode des gains principaux consiste à trouver un contrôleur  $K(s)$  donné par l'équation (3.27) de telle sorte que l'équation (3.28) soit satisfaite et que les conditions (3.32) et (3.35) pour une stabilité et des performances robustes soient également vérifiées.

La méthode des gains principaux repose sur la recherche d'un contrôleur avec la structure suivante (Merabti N et al, 2020) :

$$K(s) = K1 * K2(s) * K3 * K4(s) \quad (4.7)$$

Où:

$K1 = G^{-1}(s)$  est l'inverse du gain statique : il est utilisé pour découpler le processus en basse fréquence ;

$K2(s) = 1/s$  est un ensemble d'intégrateurs pour éliminer l'erreur statique ;

$K3$  est un coefficient de compromis entre la stabilité et les performances ;

$K4(s)$  est une structure permettant de réduire l'amplitude de la résonance en moyenne et haute fréquence.

Afin de ne pas affecter le contrôleur en basse fréquence, nous devons régler  $K4(0) = I$ , cela peut être obtenu en minimisant les critères suivants:

$$\min K4(J) = \min K4 \max w[\sigma \max(T) \sigma \max(\Delta m)]$$

Où :

«  $\sigma \max(T) * \sigma \max(\Delta m)$  » est la condition de robustesse sur la stabilité

### 4.2.3. Application

Un modèle nominal utilisé dans la conception est défini par :

$$H_3(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.04}{84s + 1} & \frac{1.762}{348s + 1} & \frac{10.609}{7150s^2 + 725s + 1} \\ 0 & \frac{1.81}{360s + 1} & \frac{10.739}{691s + 1} \\ 0 & 0 & \frac{10.83}{653s + 1} \end{bmatrix}$$

Le contrôleur obtenu :

$$K1 = G^{-1}(0) = \begin{bmatrix} 0.4902 & -0.4772 & -0.0070 \\ 0 & 0.5525 & -0.5478 \\ 0 & 0 & 0.0923 \end{bmatrix}$$

La structure **K1** sert à découpler le système en basses fréquences, en effet la figure suivante illustre cela:

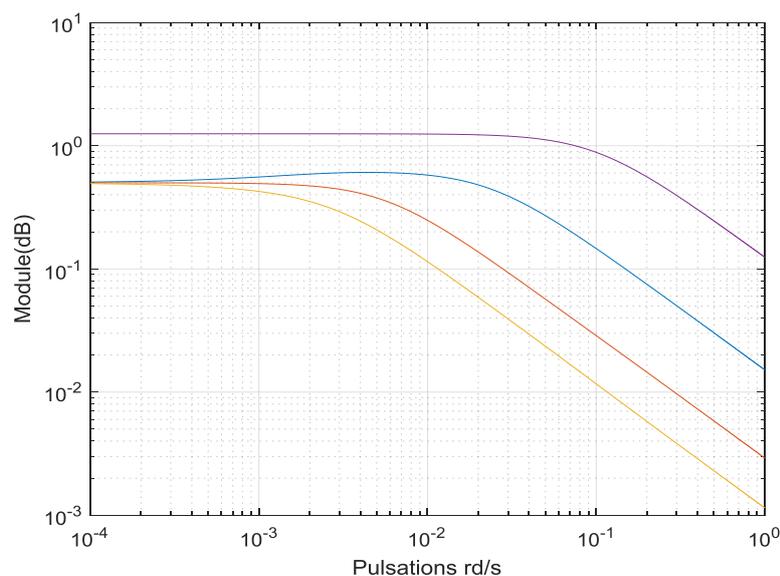


Figure 4.20. Les gains principaux du processus

Le gabarit fréquentiel ci-dessus illustre, les valeurs singulières du processus

$$K2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix}$$

L'effet de l'ensemble intégrateur  $K2 (s)$  est donné sur la figure (4 .22)

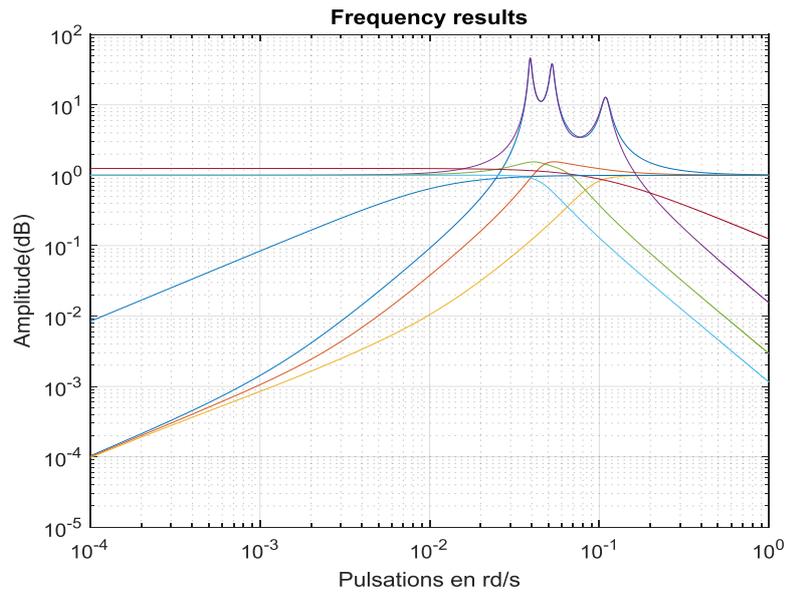


Figure 4.21. Les résultats fréquentiels

On peut observer le découplage en basse fréquence jusqu'à  $10^{-2}$  ainsi qu'une erreur statique nulle.

Nous pouvons également voir l'apparition de pics de résonance de moyenne fréquence de  $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  qui seront éliminés par la structure  $K4$ .

$$\begin{bmatrix} k_{11}s + 1 & k_{12}s & k_{13}s \\ 0 & k_{22}s + 1 & k_{23}s \\ 0 & 0 & k_{33}s + 1 \end{bmatrix}$$

Où les valeurs  $k_{ij}$  obtenues sont :

$k_{11} = 84; k_{12} = 265,9; k_{13} = 390,5; k_{21} = k_{31} = k_{32} = 0; k_{22} = 360; k_{23} = 310,2; k_{33} = 653;$

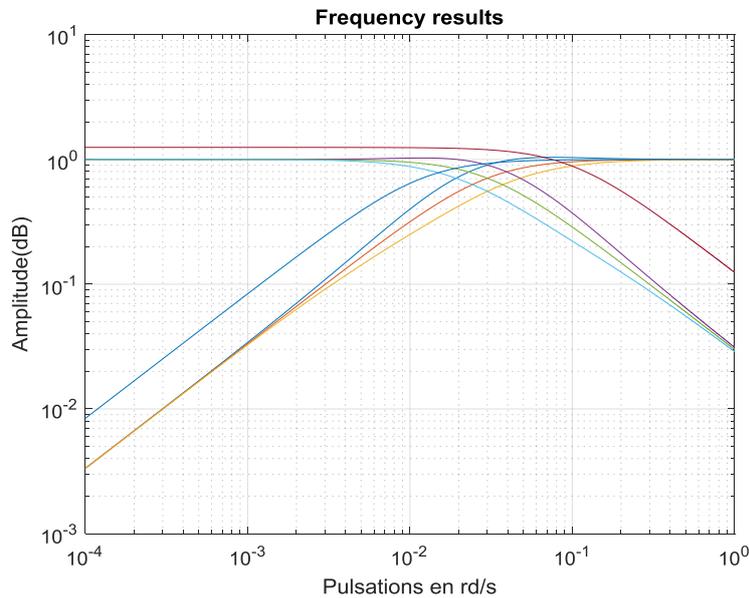
## Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions

Sont obtenus par la minimisation du critère donné dans l'équation (3.28). La valeur du coefficient ( $K3 = 0,03$ ) est obtenue par la simulation, afin d'ajuster le compromis entre stabilité et performance.

Enfin, nous pouvons donner le contrôleur global de l'équation (3.27) comme suit:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1.235s + 0.01471}{s} & \frac{-1.243s - 0.01432}{s} & \frac{1.165s - 0.0002102}{s} \\ 0 & \frac{5.967s + 0.01657}{s} & \frac{-5.591s - 0.01644}{s} \\ 0 & 0 & \frac{1.809s + 0.00277}{s} \end{bmatrix}$$

La figure (4.22) illustre les résultats dans le domaine fréquentiel où l'on peut observer que les conditions de robustesse ne sont pas violées ; la stabilité est garantie si la plus grande valeur singulière de la fonction de matrice de transfert en boucle fermée  $\sigma_{max}T(s)$ , est inférieure à la limite supérieure de la plus grande valeur singulière des incertitudes du modèle ( $\frac{1}{[\sigma_{max}W_t(s)]}$ ) ; La même idée est utilisée pour le critère des performances.



**Figure 4.22. Résultats Fréquentiels**

On constate que les conditions de robustesse sur la stabilité et sur les performances sont satisfaites : les gains principaux du transfert  $T(s)$  ne coupent par la condition de robustesse sur la stabilité  $1/W_t(s)$ , ce qui assure la robustesse de la stabilité, les valeurs singulières de la sensibilité  $S(s)$  sont au dessous de la condition de robustesse sur les performances  $1/$

$W_p(s)$  ce qui permet le rejet des perturbations et garantit les performances souhaitées dans la synthèse.

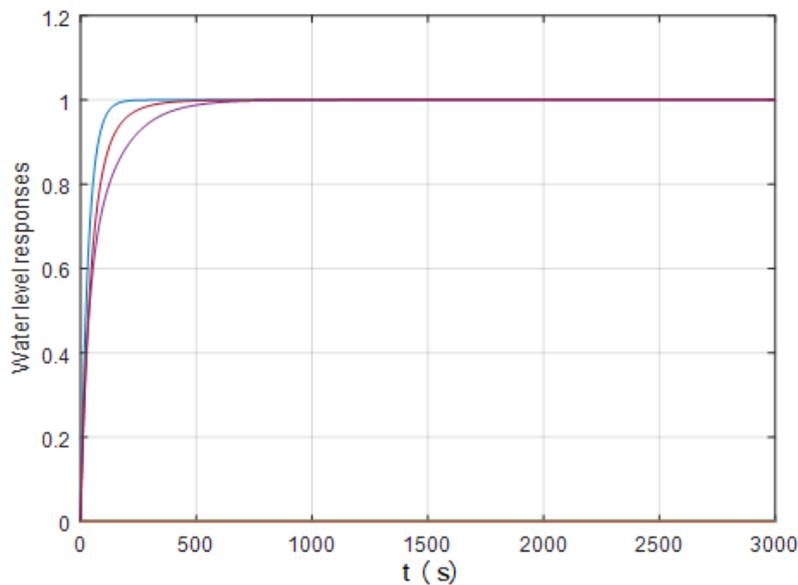
▪ **Résultats temporels :**

On s'intéresse aux résultats temporels, à savoir les réponses indicielles des sorties et les commandes du contrôleur  $K(s)$ . En premier lieu, les réponses indicielles (pour un échelon unitaire)

Appliquons à l'entrée du processus un signal de type échelon unitaire sous forme :

$$U(t) = \begin{bmatrix} u & 0 & 0 \\ 0 & u & 0 \\ 0 & 0 & u \end{bmatrix} \text{ où } u(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{si } t \leq 0 \end{cases}$$

Un tel test est largement utilisé pour l'analyse des systèmes car on considère que l'action des perturbations est similaire à un signal saut. Ces réponses indicielles données dans les trois figures suivantes, montrent que la stabilité et les bonnes performances sont réalisées avec de fortes atténuations des interactions (couplage faible). Les résultats de la simulation montrent l'efficacité de la stratégie de commande choisie.



**Figure (a)** Réponses temporelles pour les régimes nominales et perturbés à échelon [1 0 0]'

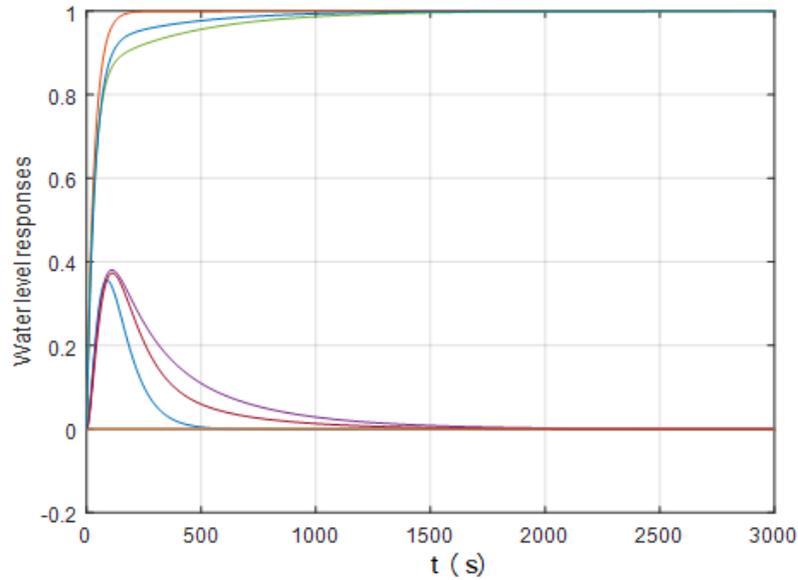


Figure (b) Réponses temporelles pour les régimes nominales et perturbés à échelon  $[0 \ 1 \ 0]'$

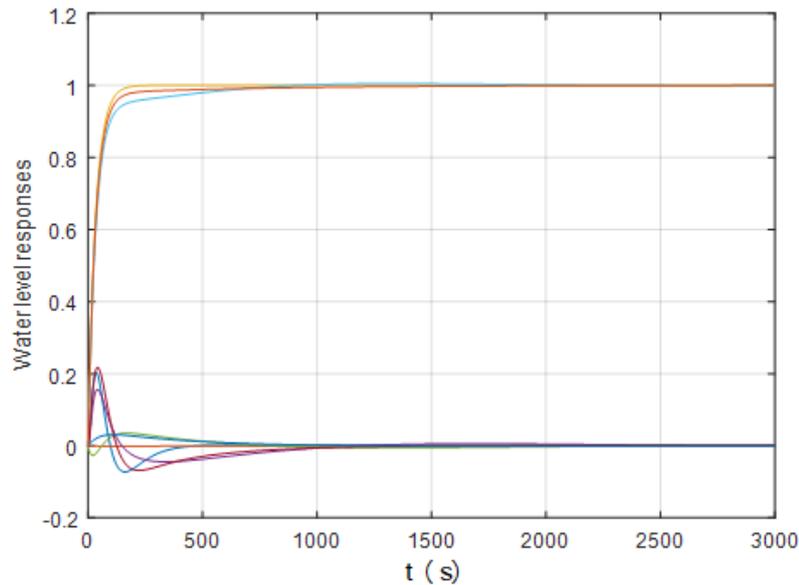


Figure (c) Réponses temporelles pour les régimes nominales et perturbés à échelon  $[0 \ 0 \ 1]'$

Figure 4.23. Réponses temporelles pour les régimes nominales et perturbés à échelon  $[1 \ 0 \ 0]'$ ,  $[0 \ 1 \ 0]'$  et  $[0 \ 0 \ 1]'$

Les réponses temporelles observées dans les figures précédentes ; reflètent l'incidence fréquentielle où la stabilité et de bonnes performances sont assurée d'où le succès de la méthode de synthèse avec de fortes atténuations des interactions (faible couplage).

#### **Chapitre IV : Application, Résultats et Discussions**

Au début de la simulation on constate l'apparition de quelques oscillations qui sont dues aux erreurs de modèles ; une fois que ces oscillations ont disparu, la poursuite devient quasi exacte ce qui met en évidence la robustesse de la loi de commande.

Les résultats obtenus répondent aux objectifs décrits dans l'introduction, c'est-à-dire qu'elle est robuste donc elle augmente la fiabilité et améliore la régulation du niveau d'eau dans un canal à surface libre.

D'après l'analyse des résultats obtenus avec la simulation par Matlab, et les modèles utilisés qui permettent une description précise des principaux canaux d'irrigation, la stratégie de la commande robuste basée sur la méthode des gains principaux est plus efficace et fiable par rapport à celle du PID conventionnelle. Les résultats de simulation montrent que la bonne dynamique de poursuite des trajectoires de référence dépend du choix adéquat des paramètres de synthèse. Ces résultats ont été confirmés dans le plan temporel.

La synthèse par la méthode des gains principaux a permis d'obtenir un contrôleur capable d'assurer la stabilité en boucle fermée et de garantir les performances spécifiées.

En conclusion, L'application de la théorie gains principaux robuste pour commander notre système hydraulique a conduit à des résultats satisfaisants sont très encourageants mérite une validation expérimentale pour application en temps réel aux canaux de dimension naturelle.

## *CONCLUSION GENERALE*

---

L'intérêt de la commande robuste est essentiellement sa capacité à transformer les problèmes de synthèse de la lois de commande classiques basées sur l'analyse nécessitant un savoir-faire et des connaissances théoriques importantes de la part de l'Automaticien en des problèmes d'optimisation facilement compréhensibles et programmables.

Différentes stratégies pour la commande des systèmes d'irrigation ont été décrites et plusieurs méthodes ont également été proposées et développées pour les canaux à surface libre mono-variables et multi-variables. Les expériences réalisées confirment que les principaux canaux d'irrigation peuvent avoir de grandes variations dans leurs paramètres dynamiques lorsque le débit ou d'autres paramètres hydrauliques changent. Les portes sont contrôlées et exploitées à l'aide de contrôleurs et d'une stratégie de contrôle appropriés.

Après un bref rappel de quelques notions de base sur les systèmes mono-variables et multi-variables et leurs caractéristiques, nous avons présenté quelques généralités sur les différentes méthodes utilisées.

Dans la première partie, nous avons présenté, appliqué et validé deux contrôleurs différents pour le modèle du canal principal impérial d'Aragon (AIMC).

Ces deux structures de contrôleurs différentes ont été appliquées et comparées pour le premier bassin (Bocal). Le premier présentant un PI et un contrôleur PID, l'autre comprenant le Predicteur de Smith, SP, et un Predicteur de Smith Filteré, FSP.

A la lumière des résultats obtenus on peut affirmer que, selon l'objectif désiré, les deux contrôleurs de cette dernière structure ont des performances supérieures. Les résultats simulés montrent les améliorations de robustesse obtenues avec le contrôleur FSP par rapport aux autres. En effet, on a obtenu un comportement dynamique plus rapide et plus amorti que le PI et le PID ; un meilleur comportement dynamique global pour les paramètres nominaux du processus par rapport au régulateurs PI et le PID en termes de temps de réponse, et de dépassement mais au prix d'un effort de commande plus grand. La robustesse est améliorée dans le cas de disparité de modèles, et le rejet de perturbations est meilleur. Par conséquent, on peut considérer cette méthode de commande développée prédicteur de Smith filtrée comme satisfaisante.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté, appliqué et validé un contrôleur automatique efficace pour un prototype canal d'irrigation ouvert à plusieurs biefs afin de réguler le niveau d'eau à l'extrémité aval de chaque bief à une valeur de référence spécifiée, sous les perturbations de l'afflux. En effet, il s'agit du prototype de canal d'irrigation l'institut IMTA.

Le contrôleur en question est plus robuste que les contrôleurs PI standard contre les bruits en haute fréquence et les inexactitudes de modélisation. Dans les biefs des canaux d'irrigation, la dynamique change fortement avec les variations du régime de rejet. La stratégie de contrôle robuste adoptée implique un contrôleur robuste avec une méthode de gains principaux garantissant la stabilité, la robustesse et les performances. L'intérêt de ces contrôleurs est justifié par le fait que les paramètres dynamiques des biefs des canaux d'irrigation peuvent changer considérablement en fonction de ses régimes d'exploitation.

Des simulations en Matlab ont été réalisées dans ce prototype de canal d'irrigation ; Ces simulations ont montré que les commandes étaient robustes et fiables vis-à-vis des modèles utilisés. Les performances et la robustesse sont appréciables, donc le comportement de la commande est satisfaisant. Enfin, nous devons mentionner que les modèles linéaires employés obtenus par identification sont simples et nous devons savoir s'ils reflètent vraiment tous les phénomènes complexes des canaux opérationnels tels que les changements de pente, les frottements, etc.

Les différentes approches de commande proposées dans cette thèse, formulée pour des systèmes mono-variables, peuvent être applicables en l'état à des systèmes multi-variables. Toutefois, les systèmes d'irrigation multi-variables génèrent aussi de nouvelles questions, et d'autres problèmes, qui ont été abordés pour la deuxième partie. Il est possible de penser que les résultats et les conclusions obtenus sur un système à trois biefs semblent pouvoir s'étendre à un nombre supérieur de biefs. Il reste encore beaucoup de choses à étudier sur ce sujet.

Les objectifs préalablement fixés dans le cadre de ce travail : de rechercher et de concevoir une loi de commande, qui assure le rejet de perturbations, la stabilité, et la robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques et d'élaborer une commande prenant en compte des objectifs précis de performances et des contraintes de robustesse ont été atteints, les commandes élaborées sont robustes et fiables.

Comme dans la plupart des travaux de recherche, celui-ci a donné des options de solution à quelques problèmes, mais a aussi ouvert des voies d'étude intéressantes qui ont été délogé pour des recherches futures. Parmi ces perspectives, il est important de noter que :

- Ce travail repose sur toute une série de tests faits en simulation, il serait donc intéressant de pouvoir valider ces résultats sur un canal réel, et cela pour la partie commande validation expérimentale de cette étude pour confirmer le modèle et le système de commande proposés ;
- Les simulations ont montré que la commande obtenue était robuste vis-à-vis du modèle utilisé, mais aucune étude théorique n'a été réalisée à ce sujet. Il serait donc intéressant de réaliser une étude théorique de robustesse plus complète, en prenant par exemple des modèles de cinq biefs ou plus avec l'ajout des perturbations ou d'incertitudes paramétriques ;
- plusieurs points sont à approfondir et ouvrent la voie vers de nouveaux axes de recherche.

**Chapitre I**

Aguilar J et Al. (2009). Automatic control of flows and levels in an irrigation anal. *IEEE Transactions on Industry Applications* , pp. 2198-2208.

Aguilar J V et Al. (2012). Adaptive predictive expert control of levels in large canals for irrigation water distribution. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* , 945-960.

Axel Lødemel Holene. (2013). Performance and Robustness of Smith Predictor Control and Comparison with PID Control. *Master's thesis* .

Bettayeb, M. (2017). Smith predictor based fractional order filter PID controllers design for long time delay systems. *Asian Journal of control* , 19 (2), 1-12.

Charbonnaud P et al. (2011). A supervised robust predictive multi-controller for large operating conditions of an open-channel system. *World congress, 18*, pp. 4620-4625.

Clemmens, A. (1989). Control of irrigation canal networks. *Journal of Irrigation Drainage engineering* , 96-110.

Coron J M et al. (1999). a Lyabunov approach ton control irrigation canals modelled by Saint-venant equations. *European control conference* . Germany.

D Lozano et al. (2010). Simulation of automatic control of an irrigation canal. 91-100.

Doyle J C and Stein G. (1981). Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical Modern Synthesis. *IEEE Trans Automation and control* , AC-26 (1), 4-16.

Duviella E et al. (2010). Supervised gain-scheduling multimodeldeux versus linear parameter varying internal model control of open-channel systems for large operating conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 543-552.

Hemayathy P R et al. (2019). Design of Smith Predictor Based Fractional Controller for Higher Order Time Delay Process. *119* (3), 481-498.

Horvath K et Al. (2012). Comparison of two control algorithms based on different anal models using numerical simulation and experiments on laboratory canal. *10th International Conferences on Hydroinformatics*. Hamburg.

Horvath K et Al. (2013a). The effect of the choice of the control variables of the water level control of open channels. *10th IEEE International Conference on Networking Sensing and Control* . Paris France.

Jean-François, D. (2001). Contribustion à la commande non linéaire de systèmes d'irrigation.

- Litrice X and Fromion V . (2004a). Frequency modelling of open-channel Flow. *Journal of hydraulic engineering* , 806-815.
- Litrice X and Fromion V . (2004b). Simplified modeling of irrigation canals for controller design. *Journal of irrigation and drainage engineering* , 373-383.
- Litrice X and Fromion V . (2006b). Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool . *Journal of irrigation and drainage engineering* , 359-368.
- Litrice X and Fromion V. (2006a). H-infinity control of an irrigation canal pool with a mixed control politics. (I. Transactions, Éd.) *Control Systems Technology* , 99-111.
- Litrice X and Georges D . (1999). Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system. *Applied Mathematical Modelling* , 809-827.
- Litrice X and Georges D. (1999). Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system. *Modelling applied mathematical modelling* , 809-827.
- Litrice X et Al. (2007). Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool. *Journal of irrigation and drainage engineering* , 27-37.
- Litrice X et Al. (2008). Conversion from discharge to gate opening for the control of irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 305-314.
- Litrice X et al. (2007). Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool . *Journal of irrigation and drainage engineering* , 27-37.
- M Bolze et al. (1993). Modernisation d'un réseau d'irrigation Application au système d'irrigation. *La Houille blanche* .
- Malaterre P O and Baume J P. (1998). Modeling and regulation of irrigation canal: existing applications and on-going researches. *IEEE International Conference on Systems Man & Cybernetics*, (pp. 3850-3855). California.
- Malaterre, P.-o. (1994). *La gestion des canaux et des rivières*. Chapitre I.
- Mareels I et Al. (2005). Systems engineering for irrigation systems: Successes and challenges. *Annual reviews in control* , pp. 191-204.
- Normey-Rico J E . (1997). Improving the robustness of dead-time compensating PI controllers. *Control Engineering Practice* , pp. 801-810.
- Normey-Rico J E & Camacho E F. (1998). Dead-time compensators: A unified approach. *Proceedings of IFAC*, (pp. 141-146). Grenoble France.
- Pierre-oliver, M. (2003). Le controle automatique des canaux d'irrigation: état de l'art et perspectives. *CNRS*. Montpellier.

- Pierre-Olivier MALATERRE et al. (2013). Les techniques d'irrigation. *Sciences eaux & territoires n°11* .
- Ratinho et al. (2002). Modelling control and field tests on an experimental irrigation canal. *10th Mediterranean Conference on Control and Automation*, (pp. 53-62).
- Rijo M. (2003). Local automatic control modes in an experimental irrigation canal. *Irrigation and Drainage Systems* , 179-193.
- Rogers D and Goussard J. (1998). Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 11-15.
- Schuermans J. (1997). *Control of water levels in open channels*. University of Technology Delft The Netherlands.
- Sepulveda, C. (2008). *Instrumentation model identification and control of an experimental irrigation canal*. Barcelona Spain: PhD thesis.
- TNL Vu, M Lee. (2014). Smith predictor based fractional-order PI control for time-delay processes. *Korean Journal of Chemical Engineering* , 31 (18), 1321-1329.

## Chapitre II

- Arauzet T et al. (2020). Design of PI Controllers for Irrigation Canals based on linear Matrix Inequalities. *MDPI journal* .
- BEGHOVICH O et al. (2007b). Decentralized fuzzy gain scheduling control for an open irrigation canal prototype. *4th International Conference on Electrical & Electronics Engineering* , (pp. 14-17).
- BEGHOVICH O et al. (2007). Ofelia Begovich Real-time implementation of a decentralized control for an open irrigation canal prototype *Asian Journal of Control. Asian Journal of control* , 170-179.
- BEGHOVICH O et al. (2007c). Predictive control with constraints of a multi-pool irrigation canal prototype. *Latin American applied research* .
- BEGHOVICH O et al. (2005). Real-time application of a fuzzy gain scheduling control scheme to a multi-pool open irrigation canal prototype. *Journal of intelligent fuzzy systems* , 189-199.
- BEGHOVICH O et al. (2007a). Real-time implementation of a decentralized control for an open irrigation canal prototype. *Asian Journal of Control* , 170-179.
- BEGHOVICH O et al. (2007). Predictive control with constraints of multi-pool irrigation canal prototype. *Latin American Applied Research* , 177-185.

- Bejaoui, N. (2006). *Supervision dynamique d'un canal d'irrigation*. Thèse de doctorat.
- Buyalski, C. P. (1991). Canal systems automation manual. *A Water Resources Technical Publication*, 1, 113.
- Carlos, A. S. (2007). *Instrumentation, Model identification and control of an experimental irrigation canal*. Thèse de doctorat.
- DJABRI, M. R. (2018). *Synthèse d'un Prédicteur de Smith (SP) par l'utilisation des transferts d'ordre non entier*. Thèse de doctorat.
- Dulhoste, J. F. (2001). *Contribution à la commande non linéaire de systèmes d'irrigation*. Thèse de doctorat.
- Farkh, R. (2011). *commande PID des systèmes à retard*. Thèse de doctorat.
- Horvath, K. (2013). *Model Predictive Control of Resonance Sensitive Irrigation Canals*. Thèse de doctorat.
- Litrico, X. (2007). *Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande de systèmes hydrauliques à surface libre*. HDR.
- Litrico, X. (2007). *Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande de systèmes hydrauliques à surface libre*. Mémoire pour habilitation.
- Litrico, X. (1999). Modélisation et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre : application aux rivières et canaux d'irrigation. *Cemagref*.
- Malaterre, P O. (2013). Les techniques d'irrigation. *Sciences Eaux et Territoires* (11).
- Malaterre, P. O. (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage*.
- Malaterre, P.-O. (2007). Control of irrigation canals: why and how? *International Workshop on Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources*, (pp. 271-292). Montpellier, France.
- Malaterre, P.-O. (1995). La régulation des canaux d'irrigation : caractérisation et classification.
- Malaterre, P.-o. (2003). Le contrôle automatique des canaux d'irrigation : état de l'art et perspectives. *Colloque Automatique et Agronomie*.
- Marcou, O. (2010). *Modélisation et contrôle d'écoulements à surface libre par la méthode de Boltzmann sur réseau*. Univ Genève.
- Merabti N et al. (2013). Robust control of main irrigation canal pool. *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology*.

Monje C A et al. (2010). Fractional order systems and controls. Fundamentals and Applications. *Springer* .

Nebbar, M. (2018). *Contribution à l'étude de l'écoulement critique*. Thèse de doctorat.

Niculescu, S. I. (2001). Delay effects on stability: A robust control approach. *Springer* , 269.

Ogata, K. (1997). *Modern Control Engineering* (éd. 5th). New Jersey: Pearson.

Ouarit, H. (2004). *Réduction des systèmes à paramètres distribués. Application à la commande optimale robuste des canaux d'irrigation*. Thèse de doctorat.

Overloop P J Van et al. (2010). Real-Time Implementation of Model Predictive Control on Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District's WM Canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 747-756.

R Perez et al. (2011). Control-oriented model of a complex irrigation main canal pool. *18th IFAC World Cong* . Italy.

Rochdi, B. B. (2015). *Commande robuste des systèmes non linéaires*. Thèse.

VIAL, Y. (2004). *Intégration d'une commande multi variable pour la régulation des canaux d'irrigation Application à la branche d'Aix Nord du Canal de Provence*. Thèse de doctorat.

### Chapitre III

Alazard D et al. (1999). Robustesse et Commande Optimale. *Cépadès Editions* .

Astrom K J et al. (2001). PID control. *Control Engineering Practice* , 9, 1159-1161.

BEGHOVICH O et al. (2007a). Real-time implementation of a decentralized control for an open irrigation canal prototype. *Asian Journal of Control* , 170-179.

BEGOVICH O et al. (2007). Predictive control with constraints of multi-pool irrigation canal prototype. *Latin American Applied Research* , 177-185.

DJABRI, M. R. (2018). *Synthèse d'un Prédicteur de Smith (SP) par l'utilisation des transferts d'ordre non entier*. Thèse de doctorat.

Doyle J C and Stein G. (1981). Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical Modern Synthesis. *IEEE Trans Automation and control* , AC-26 (1), 4-16.

Dulhoste, J. F. (2001). *Contribution à la commande non linéaire de systèmes d'irrigation*. Thèse de doctorat.

- Feliu-Batle V et al. (s.d.). Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture* , 205-217.
- Gastillo-Garcia F.J et al. (2011). Time Domain Tuning of a Fractional Order PI $\alpha$  Controller Combined with a Smith Predictor for Automation of Water Distribution in Irrigation Main Channel Pools. *IFAC* .
- Hamlaoui, N. (2015). *Commande Optimale d'un Bras Manipulateur*. Mémoire de Magister.
- Holene, L. A. (2013). *Performance and Robustness of Smith Predictor Control and Comparison with PID Control*. Master's thesis, Norwegian University.
- Horvath, K. (2013). *Model Predictive Control of Resonance Sensitive Irrigation Canals*. Thèse de doctorat.
- Jerome N. F et al. (1986). High performance multivariable control strategies for systems having time delays. *AIChE Journal* , 914-931.
- LARABI, M. S. (2008). *Commande Robuste par la Synthèse LQG/LTR*. Thèse de doctorat.
- LAROCHE, E. (2011-2012). *Commande robuste*.
- LAROCHE, E. (2007). *Identification et Commande Robuste de Systèmes Électromécaniques*. Thèse de doctorat, Strasbourg.
- Litrico, X. (2007). *Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande de systèmes hydrauliques à surface libre*. HDR.
- Maalej, S. (2014). *Commande robuste des systèmes à paramètres variables*. Thèse de doctorat.
- Mac Farlane A.G.J et al. (1977). A design technique for linear multivariable feedback systems. *International Journal of Control* , 25, 837-879.
- Malaterre P O & Baume J P. (1998). Modeling and regulation of irrigation canal: existing applications and on-going researches. *IEEE Int Conf on systems, Man & Cybernetics*.
- Malaterre, P. O. (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage* .
- Malaterre, P.-o. (1994). *La gestion des canaux et des rivières*. Chapitre I.
- Malaterre, P.-o. (1994). *La gestion des canaux et des rivières*. Chapitre I.
- Milich L et al. (1986). Feedback System Design with an Uncertainty Plant. *Laboratory for Information and Decision Systems* , 1614.

- Normey-Rico J.E et al. (2007). Control of Dead-time Processes. *Springer* .
- Normey-Rico J.E et al. (1997). Improving the robustness of dead-time compensating PI controllers. *Control Engineering Practice* , 5 (6), 801-810.
- Normey-Rico J.E. et al. (2008). Dead-time compensators: A survey . *Control Engineering Practice* , 407-428.
- Normey-Ricoet J. et al. (2014). An automatic tuning methodology for a unified dead-time compensator. *Control Engineering Practice* , 27, 11-22.
- P Javadi Kia et al. (2009). Intelligent Control Based Fuzzy Logic for Automation of Greenhouse Irrigation System and Evaluation in Relation to Conventional Systems. *World Applied Sciences Journal* , 16-23.
- Savonov G & Chiang R.Y. (1988). CACSD using the State Space  $L_\infty$  Theory-A Design. *Trans Auto Control* , AC-33 (5), 477-479.
- Shokri S et al. (2010). Improved PI Controllers Tuning in Time-delay Smith Predictor with Model Mismatch. *International Journal of Chemical Engineering and Applications* , 1 (4).
- Smith. (1957). Closed control of loops with dead time. *Chem. Eng. Progress* , 217-219.
- Stein M & Athans G. (1987). The LQG/LTR Procedure for multivariable feedback control design method. *IEEE Transactions on Automatic Control* , AC-32 (2).
- Yahmedi, S. (1993). *Mise en œuvre d'Outils Algorithmiques Permettant l'Étude de la Robustesse de la Stabilité et des Performances des Systèmes Multivariables Bouclés*. Thèse de doctorat, Québec Canada.
- Chapitre IV**
- BEGOVICH O et al. (2007). Predictive control with constraints of multi-pool irrigation canal prototype. *Latin American Applied Research* , 177-185.
- Doyle J C and Stein G. (1981). Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical Modern Synthesis. *IEEE Trans Automation and control* , AC-26 (1), 4-16.
- Feliu-Batle V et al. (2011). Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture* , 205-217.
- Feliu-Batlle V et al. (2008). Robust Fractional Order PI Controller for a Main Irrigation Canal Pool. *The International Federation of Automatic Control IFAC* .
- Merabti N et al. (2020). Robust controller for an open irrigation canal prototype. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* , 17 (1), 237-247.

Normey-Rico J.E et al. (2007). Control of Dead-time Processes. *Springer* .

Sanchez L et al. (2007). Robust Control of a Laboratory Hydraulic Canal by Using a Fractional PI Controller. *International Design Engineering Technical Conferences in Computers and information*, 5, pp. 1307-1315.