



HAL
open science

Intégration d'une commande multivariable pour la régulation des canaux d'irrigation. Application à la branche d'Aix Nord du Canal de Provence

Yann Viala

► **To cite this version:**

Yann Viala. Intégration d'une commande multivariable pour la régulation des canaux d'irrigation. Application à la branche d'Aix Nord du Canal de Provence. Automatique / Robotique. ENGREF (AgroParisTech), 2004. Français. NNT: . tel-00006514

HAL Id: tel-00006514

<https://pastel.hal.science/tel-00006514>

Submitted on 20 Jul 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE RURAL, DES EAUX ET DES
FORÊTS

/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_/_

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF
Spécialité : Sciences de l'Eau

Présentée et soutenue publiquement par

Yann VIALA

le 24 juin 2004

*à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Centre de Montpellier*

**INTÉGRATION D'UNE COMMANDE MULTIVARIABLE
POUR LA RÉGULATION DES CANAUX D'IRRIGATION**

**APPLICATION À LA BRANCHE D'AIX NORD DU CANAL DE
PROVENCE**

devant le jury suivant :

Eric PARENT	Président du Jury
Bernard GAY	Rapporteur
Didier GEORGES	Rapporteur
Pierre-Olivier MALATERRE	Directeur de thèse
Jean-Luc DELTOUR	Examineur
Jacques SAU	Examineur

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'un contrat CIFRE, dans une collaboration entre la SCP et le CEMAGREF, et au sein de l'école doctorale de l'ENGREF.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui ont permis la réalisation de ce travail de recherche, par leur collaboration, leur encadrement, leur soutien ou tout simplement leur bonne humeur.

Merci à Pierre ROUSSET, chef du service ingénierie, de m'avoir permis d'entrer à la SCP, et de m'avoir accueilli au sein de son service.

Merci à Pierre-Olivier MALATERRE d'avoir accepté d'être le directeur de cette thèse. Qu'il trouve dans ces quelques lignes l'expression de toute ma sympathie.

Mes sincères reconnaissances vont aux personnes qui ont bien voulu accepter d'être rapporteur de cette thèse, et ainsi évaluer mon travail : Didier GEORGES, professeur au laboratoire d'automatique de Grenoble, et Bernard GAY, professeur au laboratoire de mécanique des fluides de Lyon.

Merci à Eric PARENT, directeur du laboratoire de Gestion du Risque En Sciences de l'Environnement de l'ENGREF, d'avoir participé au jury et accepté d'en être le président.

Je tiens à remercier tout spécialement Jacques SAU pour l'aide qu'il m'a apporté dans ce travail. Son soutien me fut précieux, et les rapports que nous avons pus avoir durant cette période furent bien plus que ceux d'une simple collaboration.

Jean-Luc DELTOUR m'a appris qu'un ingénieur ne doit jamais perdre de vu qu'au bout de ses calculs, il y a un système réel à ne pas oublier. Merci.

Merci à toute l'équipe du service ingénierie, François BRELLE, Michel TUILLIER et Franck SANFILIPPO bien sûr, mais aussi tous les ingénieurs ingénieurs et les excellents techniciens « avec qui mes rapports furent aussi divers qu'enrichissants ». Je ne donne ici aucun autre nom de peur d'en oublier, mais ils se reconnaîtront tous.

Merci à toute la *dream team* de l'UR Irrigation TR Transcan du CEMAGREF de Montpellier pour ses conseils pointus et sa disponibilité.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille sans qui je ne serais jamais arrivé là où je suis aujourd'hui. Un grand merci à Muriel pour sa relecture et ses corrections. Merci à Emilie pour tout. Merci à Mathéo d'être là.

L'écriture ne soulage guère. Elle retrace, elle délimite. Elle introduit un soupçon de cohérence, l'idée d'un réalisme.

M. HOUELLEBECQ
Extension du domaine de la lutte

à ma compagne, à mon fils

Table des matières

1	L'eau et l'irrigation en Provence	19
1.1	Introduction	19
1.2	La problématique de l'eau en Provence	20
1.3	Historique	20
1.4	Les premiers réseaux sous pression	21
1.5	La Société du Canal de Provence	22
1.6	Le canal de Provence	23
2	La régulation dynamique	25
2.1	Introduction	25
2.2	Concept général	26
2.3	Estimation du volume	26
2.4	Action d'anticipation	30
2.5	Action corrective	33
2.5.1	Fonction de transfert du procédé	34
2.5.2	Fonction de transfert du contrôleur local	34
2.6	Paramètres de contrôle	36
2.7	Commentaires sur la régulation dynamique	36
3	Le système à commander	39
3.1	Introduction	39
3.2	La branche d'Aix Nord	40
3.3	Commandes, mesures, consignes et perturbations	41
3.4	Les contraintes	42
3.5	La modélisation du système	43
3.5.1	Le modèle non-linéaire	44
3.5.2	Le modèle linéaire	45
3.6	Identification des dynamiques	47
3.6.1	Dynamique débit amont – débit aval	47
3.6.2	Dynamique débit – volume	54
3.7	Le modèle multivariable	54

4	La commande multivariable	59
4.1	Introduction	59
4.2	Les différents types de commandes existants	59
4.3	La commande optimale	61
4.3.1	Généralités	61
4.3.2	Calcul de la commande	61
4.3.3	Solution asymptotique	63
4.4	Observateur d'état	65
4.4.1	Principe	65
4.4.2	Convergence	66
4.4.3	Observation de prélèvements non mesurés	67
4.4.4	Convergence de l'observateur global	68
4.5	Conclusion	69
5	Application à la branche d'Aix Nord	71
5.1	Introduction	72
5.2	Calage du contrôleur	72
5.2.1	Méthodologie	72
5.2.2	Règle de Bryson	72
5.3	Calage de l'observateur	73
5.4	Robustesse	74
5.5	Traitement des cas particuliers	76
5.5.1	Généralités	76
5.5.2	Calcul du débit à régler	76
5.5.3	Report vers les perturbations	77
5.5.4	Évaluation	77
5.6	Définition des scénarios	78
5.7	Modèle linéaire	78
5.7.1	Généralités	78
5.7.2	Observateur simple	79
5.7.3	Observateur global	79
5.8	Modèle non-linéaire	85
5.8.1	Généralités	85
5.8.2	Préfiltre asymptotique	85
5.8.3	Préfiltre non asymptotique	93
5.9	Comparaison avec des mesures de terrain	102
5.9.1	Généralités	102
5.9.2	Simulation et commentaires	102
5.10	Conclusions	105
6	Conclusion générale et perspectives	107
	Annexes	109

A	Gestion de la station de pompage	111
B	Liste des symboles utilisés	117
	Bibliographie	123

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures

1.1	Carte des ouvrages	23
2.1	Algorithme de principe de la régulation dynamique	27
2.2	Taux de variation du débit	32
2.3	Principe de la boucle fermée	33
2.4	Procédé à commander	34
2.5	Contrôleur	35
3.1	Système étudié	40
3.2	Signaux pour l'identification	48
3.3	Débit aval donné par le modèle ARX	49
3.4	Débit aval donné par identification du modèle d'Hayami	50
3.5	Temps caractéristiques du canal	51
3.6	Débit aval donné par la fonction de transfert débit – débit	52
3.7	Diagramme de Bode des différents modèles	53
3.8	Réponse indicielle du transfert perturbations – variables contrôlées	56
3.9	Réponse indicielle du transfert commandes – variables contrôlées	56
3.10	Réponse indicielle du transfert perturbations – variables mesurées	57
3.11	Réponse indicielle du transfert commandes – variables mesurées	57
4.1	Boucle de commande	61
5.1	Points d'entrée des perturbations	74
5.2	Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des commandes	79
5.3	Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des sorties	80
5.4	Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des commandes	81
5.5	Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des sorties	81
5.6	Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations sans prévision – Différence entre l'état et l'état observé	82

5.7	Modèle linéaire – Observateur global – Rejet de perturbations – Évolution des commandes	82
5.8	Modèle linéaire – Observateur global – Rejet de perturbations – Évolution des sorties	83
5.9	Modèle linéaire – Observateur global – Rejet de perturbations – Évolution des perturbations	83
5.10	Modèle linéaire – Observateur global – Poursuite de consignes – Évolution des commandes	84
5.11	Modèle linéaire – Observateur global – Poursuite de consignes – Évolution des sorties	84
5.12	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations – Évolution des commandes	86
5.13	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations – Évolution des sorties	87
5.14	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations – Évolution des perturbations	87
5.15	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des commandes	88
5.16	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des sorties	88
5.17	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations	89
5.18	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations – Évolution des commandes	89
5.19	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations – Évolution des sorties	90
5.20	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations – Évolution des perturbations	90
5.21	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des commandes	91
5.22	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des sorties	91
5.23	Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations	92
5.24	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des commandes	93
5.25	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des sorties	94
5.26	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des perturbations	95
5.27	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des commandes	96

5.28	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des sorties	96
5.29	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des perturbations	97
5.30	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des commandes	97
5.31	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des sorties	98
5.32	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations	98
5.33	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des commandes	99
5.34	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des sorties	99
5.35	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des perturbations	100
5.36	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des commandes	100
5.37	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des sorties	101
5.38	Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations	101
5.39	Comparaison terrain – modèle — Commandes	103
5.40	Comparaison terrain – modèle — Sorties	103
5.41	Comparaison terrain – modèle — Perturbations	104

TABLE DES FIGURES

Liste des tableaux

2.1	Table 2D des volumes	30
2.2	Organisation des données de prévision	31
3.1	Débits et volumes mensuels à la sortie du surpresseur	41
3.2	Paramètres de la fonction de transfert d'Hayami	50
3.3	Constantes de temps pour la Trévaresse	52
3.4	Dimensions des matrices dynamiques	55
5.1	Pondérations initiales du contrôleur	73
5.2	Pondérations du contrôleur	73
5.3	Pondérations des observateurs	74
5.4	Fonctions de sensibilité	75
5.5	Norme H_∞ des fonctions de sensibilité en fonction du débit	75
5.6	Débits de la station de pompage de la Barounette	76
A.1	Sélection du débit inférieur	112
A.2	Sélection du débit le plus proche	113
A.3	Sélection du débit par paliers	114
A.4	Sélection du débit par paliers décentrés	115

Chapitre 1

L'eau et l'irrigation en Provence

Sommaire

1.1	Introduction	19
1.2	La problématique de l'eau en Provence	20
1.3	Historique	20
1.4	Les premiers réseaux sous pression	21
1.5	La Société du Canal de Provence	22
1.6	Le canal de Provence	23

1.1 Introduction

L'eau est une ressource précieuse. Même si on la trouve en abondance à la surface du globe, seulement 0,8 % est directement utilisable par l'homme — eau naturellement douce. Sa répartition à la surface du globe est fortement hétérogène, 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 délicate du fait de la multiplicité de ses utilisations. Dans le monde, l'agriculture consomme à elle seule plus de 70 % de cette ressource, et l'industrie 22 %¹. Sur la part restante qui représente les usages domestiques, seulement 7 %² sont utilisés pour l'alimentation.

La gestion de la ressource est un problème majeur même pour les pays développés. À l'horizon 2025, très peu de pays du Sud méditerranéen ne disposeront des 500 m³ par an et par habitant en moyenne considérés comme minimum vital [EMV98]. Pour prendre comme exemple l'Espagne, ce pays est actuellement au monde celui comptant le plus grand nombre de barrages par habitant et par unité de surface [Blo02]. La politique de l'eau y est un enjeu de taille, car la pression des entreprises urbanotouristiques est en conflit avec les besoins des exploitations agricoles.

1. Source : Conseil Mondial de l'Eau, Mars 2000

2. Source : Office International de l'Eau, Juin 2003

1.2 La problématique de l'eau en Provence

En pays méditerranéen français, les fortes concentrations de pluviométrie, séparées par de longues périodes de sécheresse, font de la gestion de l'eau un problème majeur. Les ressources potentielles les plus importantes — Durance et Verdon — transitent dans un bassin que le relief local isole des zones littorales les plus peuplées et vivantes. L'histoire hydraulique de la Provence est donc marquée par une suite de projets visant à transférer l'eau hors du bassin pour alimenter les zones d'Aix en Provence et de Marseille. En outre, les cours d'eau sont remarquables par leurs abondances de printemps et d'automne, et leurs étiages d'hiver et surtout d'été, en décalage avec les principales pointes de la demande sociale : demande estivale d'abord pour l'agriculture et l'alimentation des villes, demande hivernale ensuite lorsque les besoins relatifs à l'exploitation de la houille blanche apparaîtront. Pour résoudre ces questions, il faudra être capable non seulement de régulariser le cours des rivières, mais encore d'accumuler de grandes réserves d'eau susceptibles de répondre aux besoins multiples des périodes de forte demande [Mar84].

La solution à ce problème technique ne trouvera son aboutissement qu'au XX^e siècle, émanant d'une volonté locale séculaire et fortement appuyée par l'État qui permettra la mise en œuvre de travaux de grande importance.

1.3 Historique

C'est au XVI^e siècle que l'on trouve l'origine des aménagements hydrauliques de la Provence, c'est à dire à la période où Adam de Craponne réalisa les premiers transferts d'un débit important utilisé à la fois pour l'énergie et l'irrigation. Le $XVIII^e$ siècle verra le développement continu des usages agricoles de l'eau, mais c'est au début du XIX^e siècle que l'hydraulique régionale prendra réellement son essor lorsque Marseille, poussée par le besoin — sécheresse de 1834, entraînant l'épidémie de Choléra — reprendra à son compte les vieux projets maintes fois remaniés depuis Craponne, d'une adduction à partir de la Durance — canal de Marseille. Quelques années plus tard, l'État se préoccupe d'assurer une ressource en eau aux Aixois — barrage Zola — et leur accorde des droits sur les eaux du Verdon qui permettront, à la fin du XIX^e siècle, la réalisation du canal du Verdon. Ce canal est caractérisé notamment par ses 20 km de souterrains que comptent les 82 km de sa longueur totale.

La loi de 1923 relative au développement des irrigations et à l'amélioration de l'alimentation publique dans les départements des Bouches-du-Rhône, du Var et du Vaucluse, au moyen des eaux du Verdon, marquera une étape capitale dans le développement de ces régions. Non seulement elle met en ordre des droits acquis en subordonnant le transfert de l'eau du Verdon au respect, voire même à l'amélioration des droits des avaliers, mais plus encore, elle anticipe sur l'avenir en arrêtant un programme de travaux : constitution de réserves sur le Verdon, dérivation et transfert de l'eau dans les départements des Bouches-du-Rhône et du Var. Cette loi de 1923,

même si elle ne connaît aucune application durant quarante ans, n'en reste pas moins une étape essentielle car elle se pose en arbitre dans le rapport des forces locales.

Bien que l'on soit encore loin de l'État-entrepreneur des années soixante, cette loi anticipe sur les préoccupations énergétiques qui seront celles des années ultérieures. Paradoxalement, alors que l'utilisation hydromécanique des canaux anciens avait peu à peu été délaissée au profit d'une spécialisation hydro-agricole, c'est la production énergétique qui va être à l'origine d'un aménagement d'ensemble des ressources en eau.

Personne ne pensait encore au canal de Provence lorsque Électricité de France décida en 1955 de construire Serre-Ponçon, poursuivant dans le bassin de la Durance des objectifs exclusivement électriques. Néanmoins, la puissance des milieux agricoles dans cette région est telle que EDF comprend très vite que dériver les eaux de la Durance sur l'étang de Berre à des fins purement énergétiques, sans tenir compte des 200 000 hectares de terres irriguées en aval serait une erreur. On craint à l'époque que les intérêts des irrigants ne soient pas suffisamment pris en compte et que l'alimentation en eau d'Avignon, qui provient de forages dans la nappe phréatique de la Durance, ne soit perturbée par les travaux, comme cela s'était déjà produit lorsque la Compagnie Nationale du Rhône avait construit certains de ses ouvrages [Mar84].

Toute la première moitié du XX^e siècle ne verra qu'une succession de projets visant à étendre le canal du Verdon qui montre déjà ses limites. De son côté, le Var cherchant à combler son retard en terme d'aménagements hydrauliques, se trouve en face de nombreuses difficultés techniques, le Verdon étant très encaissé sur ce département. De là est née la première idée d'un réseau unitaire, nommé *Canal de Provence*, qui pourrait parcourir les deux départements, d'est en ouest, et du nord au sud.

1.4 Les premiers réseaux sous pression

On pourrait ne considérer Gardanne que comme un épisode dans la construction des extensions du Verdon, mais ce serait oublier tous les problèmes que les ingénieurs ont eu à traiter lors de la prise en main du dossier. En effet, de part sa situation dans un site aux reliefs très marqués, les techniques les plus courantes d'irrigation gravitaire à la raie sont inadéquates et dangereuses. De plus, Gardanne ne dispose déjà que de peu d'eau, les parcelles sont très petites et un encombrement de surface très prononcé impose de construire les dessertes en souterrain, ce qui permet de s'affranchir des problèmes fonciers et de faire des économies par rapport à l'entretien des canaux à ciel ouvert. À partir du moment où l'on décide de capter l'eau — et que l'on dispose de la cote suffisante — on peut la mettre sous pression et en tirer les avantages potentiels de l'irrigation par aspersion.

La technique d'irrigation par aspersion en elle-même ne constitue cependant qu'un maillon dans tout une chaîne d'innovations se conditionnant mutuellement, et qui sont mises en place et adaptées à la configuration du lieu : distribution à la

demande individuelle, suppression du tour d'eau, vente au volume par compteur, pression en tuyaux permettant l'aspersion.

« C'est l'ensemble des conditions techniques du transport et de la distribution héritées du XIX^e siècle qu'il faut repenser si on veut aboutir à un usage économique de l'eau. On assistait alors à une redistribution des rôles : anciennement la société concessionnaire se chargeait du transport des eaux et les associations d'irrigants de sa distribution ; à Gardanne, les frontières sont moins nettes : l'État-entrepreneur intervient jusqu'au conseil aux agriculteurs. L'hydraulique entre dans l'ère de l'aménagement » [Mar84].

1.5 La Société du Canal de Provence

En 1957, naissait sous l'impulsion conjuguée du ministère de l'agriculture et des collectivités locales, la Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale. Cette société d'économie mixte a pour mission principale de « concourir au développement économique de la région par l'aménagement hydraulique en vue de l'irrigation et de l'alimentation en eau pour usages domestiques, agricoles et industriels, par la mise en valeur agricole et par l'aménagement rural ». Les statuts de la Société ainsi que le décret de concession de 1963 précisent que la SCP est chargée de « l'établissement et l'exploitation des ouvrages hydrauliques nécessaires à la mise en valeur de la région provençale ». Cela comprend :

- les études, la réalisation et l'exploitation du canal de Provence ;
- les études, la réalisation et l'exploitation de tout autres ouvrages tendant à la mise en valeur hydraulique et agricole de la région ;
- sur la demande des collectivités locales concernées, les études et la réalisation des travaux de modernisation des ouvrages hydrauliques déjà existants ainsi que leur exploitation ;
- les actions d'accompagnement de l'irrigation sous forme d'assistance technique aux exploitants agricoles en matière d'irrigation, et d'études ou d'interventions particulières relatives à des actions foncières d'aménagement ou de reconversion ;
- les actions d'aménagement rural ayant pour but le maintien d'activités en milieu rural.

Enfin, l'État, par sa dernière lettre de mission, a élargi les compétences de la SCP : « la vocation principale de la Société est de contribuer à l'aménagement, l'équipement et au développement économique de la région Provence Alpes Côte d'Azur ; à ce titre, et en étroite relation avec les organisations professionnelles, elle est un instrument privilégié pour la mise en œuvre des politiques qu'entend y conduire l'État, la région, les départements et les collectivités locales ». Cette nouvelle lettre de mission lui permet d'intervenir aussi bien pour gérer la ressource en eau que pour mettre en place des équipements de protection contre les inondations.

1.6 Le canal de Provence

Situé sur le canal commun EDF- SCP à 355 mètres d'altitude, la prise de Boutre marque le début du canal de Provence. Ce canal constitue en France le plus grand système hydraulique de transfert inter-bassin à buts multiples — irrigation, usage industriel et urbain, production énergétique...

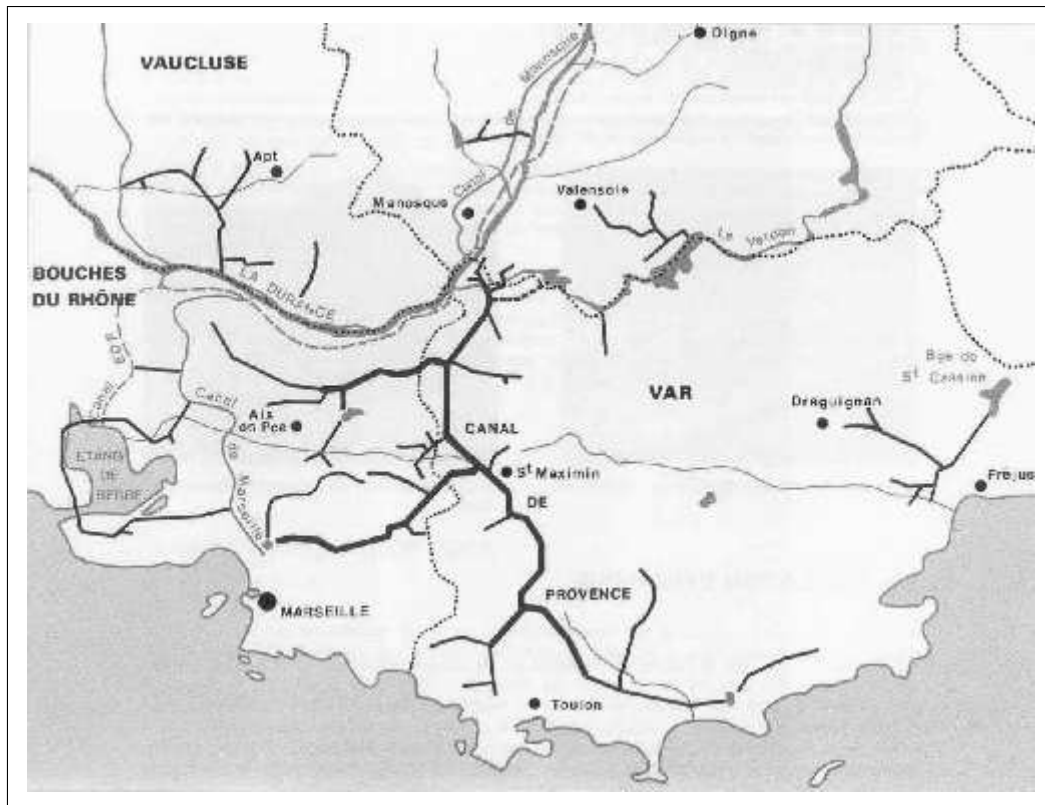


FIG. 1.1 – Carte des ouvrages

En quelques chiffres, le canal de Provence peut être décrit de la manière suivante :

- 40 m³/s de débit maximal en tête ;
- 280 millions de mètres cubes transportés en 2003 ;
- 120 km de canaux à ciel ouvert ;
- 150 km de galeries en charge ;
- 580 km de canalisations d'adduction ($\varnothing > 500$ mm) ;
- 4 300 km de canalisations de distribution ;
- 220 stations de télétransmission ;
- 14 ouvrages d'art ;
- 77 réserves ;

- 83 stations de pompage et surpresseurs ;
- 18 stations de traitement des eaux ;
- 55 000 postes d'eau ;
- 83 000 ha de surfaces équipées ;
- 500 industries et plus de 100 agglomérations urbaines alimentées ;
- 8 mini et micro centrales de production électrique.

L'ensemble des gros travaux s'est déroulé entre 1964 et 1985. Une première tranche a permis la construction du canal de Boutre à Rians, l'alimentation d'Aix en Provence, et l'apport d'un premier débit de secours à la ville de Marseille par la réalisation du canal Maître I, de la branche de Bimont, et de la branche de Marseille Nord. La deuxième phase des travaux avait pour objet l'alimentation en eau du département du Var et particulièrement de la région toulonnaise. Quant à la troisième phase, elle a vu la construction de la quatrième branche du Var et du canal de Marseille est.

De manière à ce que les utilisateurs aient l'eau à la demande tout en optimisant l'usage de la ressource, la SCP a développé, dès les années 1970, le concept de régulation dynamique qui permet la commande à distance des installations et le contrôle de la sécurité. Depuis cette date, elle a consacré du temps et des efforts à la recherche et au développement dans le domaine de la régulation des canaux. Tout en conservant le concept de base, la régulation dynamique a profité des progrès effectués dans la simulation des phénomènes hydrauliques et des techniques de commande automatique des systèmes dynamiques.

Chapitre 2

La régulation dynamique

Sommaire

2.1	Introduction	25
2.2	Concept général	26
2.3	Estimation du volume	26
2.4	Action d'anticipation	30
2.5	Action corrective	33
2.5.1	Fonction de transfert du procédé	34
2.5.2	Fonction de transfert du contrôleur local	34
2.6	Paramètres de contrôle	36
2.7	Commentaires sur la régulation dynamique	36

2.1 Introduction

La régulation dynamique, système automatique centralisé développé par la SCP, commande les mouvements des eaux dans les ouvrages de transport. Sa première implémentation date de 1971, en réponse à certaines contraintes techniques associées à l'exploitation des canaux à surface libre. En effet, fournir l'eau à la demande aux utilisateurs conduit à de grandes fluctuations de débit qui sont difficiles à prévoir. Au contraire des réseaux sous pression qui sont d'une grande souplesse d'utilisation, les canaux à surface libre sont caractérisés par des temps de réponse élevés, et présentent d'autant moins de flexibilité que les volumes de stockage sont faibles.

À cause d'une consommation trop difficile à prévoir, une régulation par l'amont seule n'est pas envisageable. Une régulation par l'aval est d'un coût élevé en génie civil. Dans la régulation dynamique, on introduit une commande par anticipation, fondée sur une prévision des besoins en eau, et une commande en boucle fermée, qui adapte l'état du canal aux conditions réelles de l'utilisation du débit [SDS02].

La régulation dynamique est fondée sur le contrôle des volumes d'eau dans chacun des biefs¹ des ouvrages de transport.

2.2 Concept général

Le but du système de régulation appelé *régulation dynamique* est de contrôler le volume² d'eau présent à chaque instant dans chacun des biefs constituant l'ouvrage de transport. Dans cette optique, le débit tout au long du canal doit être ajusté de manière coordonnée en fonction de la demande, de manière à maintenir le volume d'eau à une valeur égale à la consigne calculée. Dans la théorie où tout est idéal — canal, mesures, connaissance des consommations, etc. — cette action est suffisante. C'est ce que l'on appelle un contrôle par *anticipation*.

Malheureusement, la demande réelle à un instant donné étant souvent différente de la prévision, et les mesures de terrain étant entachées d'incertitudes, cela se traduit par une variation de volume dans chaque bief qui doit être ramené à la consigne par une action *corrective*.

Enfin, et ceci pour prendre en compte le couplage entre les différents biefs, les débits calculés à chacun des ouvrages de réglage doivent être reportés d'aval en amont. Cette action est appelée *coordination* et c'est par elle que l'aspect multivariable du système est actuellement intégré à la commande.

Finalement, le débit à appliquer à l'amont de chacun des biefs est donné par la somme des trois actions décrites précédemment :

$$Q_{\text{réglé}} = Q_{\text{prévision}} + Q_{\text{correction}} + Q_{\text{coordination}} \quad (2.1)$$

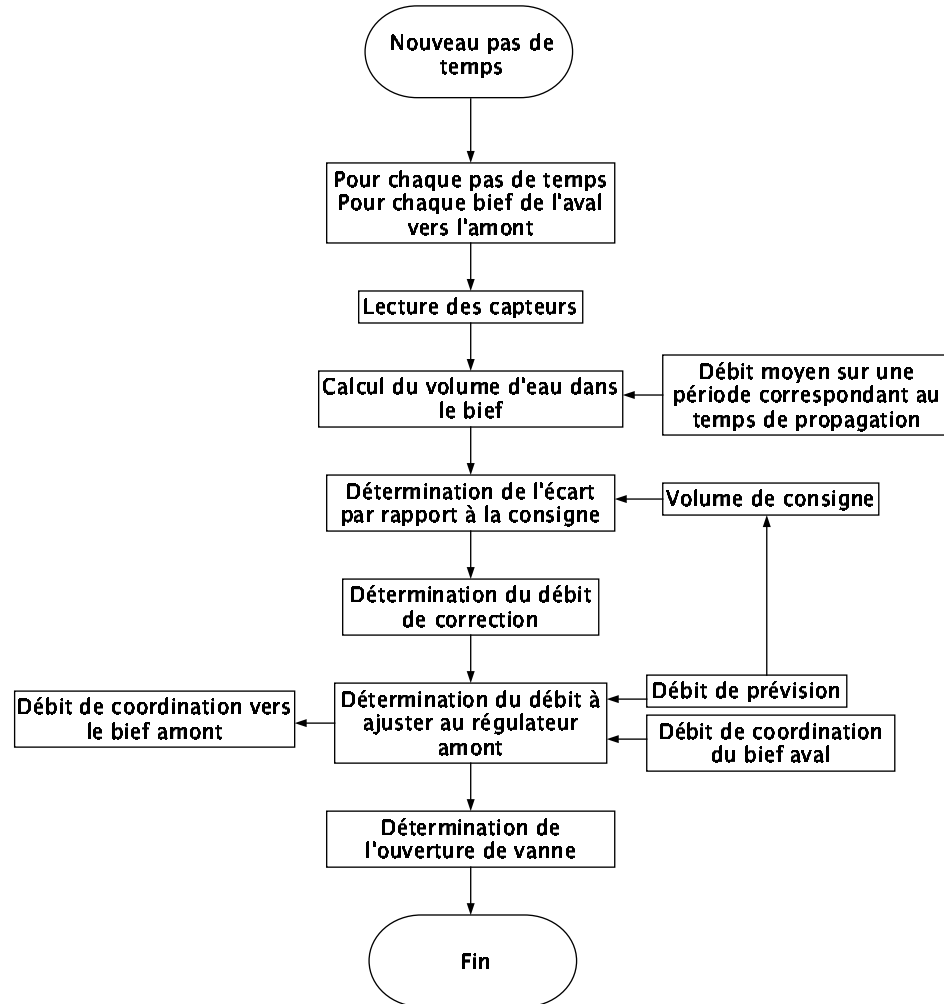
La mise en œuvre de l'algorithme de régulation dynamique nécessite la connaissance des volumes de chaque bief. Cette quantité est très difficile à mesurer directement. Il faudrait disposer de nombreux capteurs de niveau régulièrement répartis le long de chaque bief afin de pouvoir intégrer la ligne d'eau et en déterminer le volume.

2.3 Estimation du volume

En régime stationnaire, la courbe de remous d'un bief de canal fonctionnant en surface libre est parfaitement déterminée par le débit circulant dans le bief et la cote du plan d'eau à l'aval. Il est alors possible, par une série de calculs permanents, de construire pour chaque bief une table à deux entrées donnant le volume en fonction

1. Un bief est un tronçon de canal compris entre deux ouvrages de réglage du débit.

2. Dans l'implémentation classique de la régulation dynamique, les variables *contrôlées* sont les volumes dans les biefs. Il est bien évident que, selon les contraintes sur le terrain, un autre choix peut s'imposer sur certains biefs sans que cela ne modifie la démarche générale décrite dans ce chapitre.

FIG. 2.1 – *Algorithme de principe de la régulation dynamique*

du point de fonctionnement (débit, cote). Ces tables sont stockées dans la base de données de la régulation dynamique.

La solution adoptée par la SCP et éprouvée depuis trente ans consiste alors à considérer que dans le cas du fonctionnement habituel d'un canal d'irrigation, celui-ci peut être la plupart du temps considéré comme étant dans un régime pseudo-stationnaire. Le volume présent dans chaque bief est alors équivalent au volume présent en régime permanent pour le même débit moyen en transit et le même niveau à l'aval du bief.

À chaque instant de mesure, le volume d'eau est estimé de la manière suivante :

1. Détermination du temps de retard du bief ;
2. Calcul du débit moyen en transit, sur une période correspondant à ce temps

de retard ;

3. Estimation du volume par lecture dans la table, à partir de ce débit moyen et de la cote aval à l'instant actuel.

Détermination du temps de retard

On appelle temps de transit ou temps de retard hydraulique, le temps de propagation d'une petite perturbation de débit le long d'un tronçon de canal. Ce temps de retard peut être calculé à l'aide d'un modèle simplifié des équations de Saint Venant appelé modèle de l'onde cinématique [CHV80].

Considérons les équations de S^t Venant ([BSV71a], [BSV71b]), décrivant la continuité et la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/A}{\partial x} + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2.3)$$

avec les variables suivantes :

Q est le débit dans la section ;

A est la section mouillée ;

z est la cote de l'eau ;

S_f est la pente de frottement.

En considérant un canal de largeur constante et de pente constante, on peut écrire la conservation de la quantité de mouvement sous la forme suivante :

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial x} (1 - \mathcal{F}^2) = S_o - S_f \quad (2.4)$$

où :

B est la largeur au miroir ;

S_o est la pente du radier ;

\mathcal{F} est le nombre de Froude : $\mathcal{F} = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}}$.

Une première simplification, consistant à négliger les termes d'inertie, conduit au modèle de l'onde *diffusive* [CHV80], applicable si le débit n'est pas trop faible [Del92] :

$$\frac{\partial h}{\partial x} (1 - \mathcal{F}^2) = S_o - S_f \quad (2.5)$$

où h est la hauteur d'eau.

En dérivant l'équation (2.2) par rapport à x et l'équation (2.5) par rapport à t et en combinant les deux, on obtient :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{Q}{D} \frac{dD}{dA} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{D^2}{2B|Q|} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (2.6)$$

où $D = D(h)$ est la débitance du canal donnée par : $Q = D\sqrt{S_f}$. En Europe on utilise couramment la formule de Strickler : $D = K_S AR^{2/3}$, où K_S est le nombre de Strickler caractéristique du frottement, et R est le rayon hydraulique.

L'équation (2.6) est une équation aux dérivées partielles parabolique classique, décrivant la convection – diffusion de la grandeur $Q(x,t)$ à la vitesse $\Theta = \frac{Q}{D} \frac{dD}{dA}$, et avec le coefficient de diffusion $E = \frac{D^2}{2B|Q|}$. Si l'on considère, sous certaines hypothèses, que la vitesse de convection et le coefficient de diffusion sont constants, on obtient alors le modèle d'Hayami sur lequel on trouvera plus de détails dans [Mal94]. Dans le cas où les termes non stationnaires sont négligeables, (2.6) permet une bonne modélisation de la propagation des crues ; elle permet de décrire une courbe de remous puisqu'elle demande deux conditions aux limites, amont et aval.

L'équation dynamique simplifiée (2.5) est équivalente à l'équation du régime permanent, à la différence que le débit et la section varient dans le temps et sont donnés par l'équation de continuité (2.2). Les canaux fonctionnant très souvent à niveaux fixés en certains points — par des ouvrages : déversoir, ou par des règles de fonctionnement : niveau de consigne — du fait de l'équation (2.5), l'ensemble du bief à l'amont du point où le niveau est fixé est alors contrôlé par ce point. Il est possible de calculer la courbe de remous à l'aide de l'équation (2.5) et du débit $Q(x,t)$. On obtient ainsi une relation univoque entre la surface mouillée et le débit ($Q = Q(A)$ et $A = A(Q)$) en tous points $x = x_0$. On a :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \left(\frac{dA}{dQ} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.7)$$

L'équation de continuité (2.2) devient alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

L'équation (2.8) est appelée *équation de l'onde cinématique*. La quantité $\left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0}$ est la vitesse de propagation du débit Q , vitesse qui est différente à chaque section x_0 . On peut ainsi calculer pour chaque débit de fonctionnement, le retard T_H de propagation du débit sur un bief par :

$$T_H = \int_0^L \frac{dA}{dQ} dx \quad (2.9)$$

où L est la longueur du bief. Si l'on se place entre deux états stationnaires proches, en intégrant sur la longueur et en supposant que le débit ne varie pas tout au long du bief, on a :

$$T_H = \frac{\Delta V}{\Delta Q} \quad (2.10)$$

où ΔV représente la variation de volume d'eau contenu dans le bief pour une variation de débit ΔQ . Ces quantités sont calculées *a priori* et stockées dans les tables à double

TAB. 2.1 – Table 2D des volumes

Débit amont Cote aval	Q_{i-1}	Q_i	Q_{i+1}
z_{j-1}	$V_{i-1,j-1}$	$V_{i,j-1}$	$V_{i+1,j-1}$
z_j	$V_{i-1,j}$	$V_{i,j}$	$V_{i+1,j}$
z_{j+1}	$V_{i-1,j+1}$	$V_{i,j+1}$	$V_{i+1,j+1}$

entrée (voir tableau 2.1) présentes dans la base de données. Une interpolation dans cette table permet de déterminer le volume présent dans le bief considéré. Le temps de transit est alors calculé en prenant $\Delta Q = Q_{i+1} - Q_i$ où Q_{i+1} et Q_i sont les valeurs discrètes du débit présentes dans la table et entourant la valeur du débit mesuré. On a donc :

$$T_H = \frac{V(Q_{i+1}, z) - V(Q_i, z)}{Q_{i+1} - Q_i} \quad (2.11)$$

Calcul du débit moyen

L'étape suivante consiste à calculer le débit moyen à l'amont du tronçon considéré pendant un délai correspondant au temps de propagation. Le retard de propagation T_H est converti en nombre de pas de temps de régulation N_b :

$$Q_{moy} = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} Q(t - iT_e) \quad (2.12)$$

où T_e est le pas de temps de régulation.

Estimation du volume

Ce débit moyen calculé est alors associé à nouveau avec le niveau aval mesuré dans le tronçon à l'instant actuel, pour trouver enfin une estimation du volume d'eau présent à cet instant dans cette portion de canal. Pour cela, les tables à double entrée 2.1 sont encore utilisées, la valeur finale étant calculée par une double interpolation.

2.4 Action d'anticipation

La partie anticipation — ou boucle ouverte — de la régulation dynamique comporte trois composantes de prévision différentes :

1. Prévision des prélèvements aux prises, qui peut être une simple programmation de fonctionnement ou bien une procédure statistique de prévision ;
2. Déduction des débits d'anticipation à régler aux ouvrages en fonction des débits prévus aux prises ;

3. Définition des consignes de fonctionnement qui seront utilisées par l'action corrective.

Prévision statistique aux prises

En dehors des prévisions dites *manuelles* — saisies par l'exploitant, ou calculées par un logiciel de tour d'eau — on dispose sur les prises instrumentées d'une prévision statistique des débits futurs. Ces prévisions sont réalisées pour une *période statistique* P_s de 24 heures dans le futur, découpées en 96 pas de temps de 15 minutes. Elles sont mises à jour à des instants prédéfinis de la journée — environ 10 fois par jour — en s'appuyant sur des données archivées sur un *horizon statistique* H_s de 10 jours³ dans le passé.

Le tableau 2.2 présente les données utilisées pour la mise à jour de la prévision à un instant t_0 de la période statistique actuelle P_{S_0}

TAB. 2.2 – Organisation des données de prévision

		t_1	t_2	\dots	t_j	\dots	t_{96}	
Horizon statistique	$P_{S_{10}}$				\vdots			
	\vdots				\vdots			
	P_{S_i}	\dots	\dots	\dots	Q_{ij}	\dots	\dots	$\rightarrow \bar{Q}_i$
	\vdots				\vdots			
	P_{S_1}				\vdots			
	P_{S_0}				\vdots			
					\downarrow			
Horizon statistique	$P_{S_{10}}$				\vdots			
	\vdots				\vdots			
	P_{S_i}	\dots	\dots	\dots	k_{ij}	\dots	\dots	
	\vdots				\vdots			
	P_{S_1}				\vdots			
	P_{S_0}				\vdots			
					\downarrow			
					\bar{k}_j			

³ Ces valeurs numériques sont données à titre d'informations et peuvent varier d'un système à l'autre.

Pour chaque période statistique i de l'horizon statistique, nous disposons des mesures de débit Q_{ij} archivées tous les pas de temps j . La moyenne \bar{Q}_i des mesures est calculée sur chaque période, afin de définir le ratio $k_{ij} = \frac{Q_{ij}}{\bar{Q}_i}$. Les moyennes \bar{k}_j de ces ratios sur l'horizon statistique et pour chaque pas de temps sont ensuite calculées.

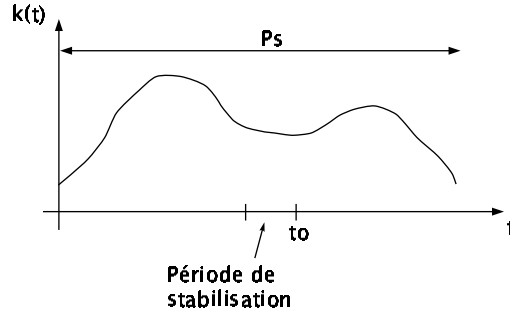


FIG. 2.2 – Taux de variation du débit

Nous disposons donc d'une courbe $k(t)$ sur la période statistique à venir, donnant à chaque pas de temps la valeur de \bar{k}_j . Cette courbe donne la tendance d'évolution du débit sur la durée d'une période statistique. Le débit moyen \bar{q} mesuré à la prise et le ratio moyen \bar{k} sont alors calculés sur une *période de stabilisation* — 4 pas de temps à la SCP — et le rapport des deux nous donne un débit d'ajustement à l'instant considéré t_0 , servant à recalculer la tendance $k(t)$ sur le débit actuel observé .

$$Q_{ajust}(t = t_0) = \frac{\bar{q}}{\bar{k}} \quad (2.13)$$

Le scénario de prévision est alors calculé sur la période statistique par :

$$Q_{prev}(t) = k(t)Q_{ajust}(t_0), t \in [t_0 ; t_0 + P_s] \quad (2.14)$$

Débit d'anticipation aux ouvrages

Cette partie de l'ensemble du processus de prévision comporte deux approches.

La prévision aux stations de pompage consiste à gérer le fonctionnement des pompes d'une station de manière à atteindre des objectifs de volume sur la réserve alimentée à la fin des différentes périodes de tarification EDF. Nous ne donnerons pas ici plus de précisions car la description du fonctionnement de la station de pompage de la Barounette sera donnée en détail au chapitre 3.4.

La deuxième approche concerne la prévision sur un tronçon de canal fonctionnant à volume contrôlé. Le retard introduit à l'anticipation dépend des consignes de fonctionnement. Ces dernières sont choisies au cours des études de régulation, et les volumes correspondants sont mémorisés dans des tables donnant le volume de

consigne en fonction du débit moyen prévu sur le canal. La pente locale de la courbe ainsi obtenue donne le retard hydraulique au point de fonctionnement considéré.

Le scénario de débit d'anticipation en tête d'un tronçon de canal est donné par un calcul itératif, à partir du retard hydraulique prévisionnel d'anticipation T_H^p obtenu au pas de temps précédent. Celui-ci permet de propager vers l'amont l'ensemble des prévisions réalisées aux points de prélèvement sur le tronçon de canal. Le débit moyen de prévision en tête du tronçon au pas de temps courant t_0 est alors calculé en réalisant la moyenne du débit d'anticipation pour t variant de t_0 à $t_0 - T_H^p$. Le retard hydraulique prévisionnel est à nouveau calculé à partir de ce débit moyen de prévision, et sa valeur est comparée à la valeur précédente. Si l'écart est trop important — supérieur à la moitié du pas de temps de régulation — le calcul est réitéré.

Définition des consignes de fonctionnement

La valeur finale du débit moyen de prévision sert à calculer le volume de consigne du bief pour le pas de temps courant à partir de la table de consigne mentionnée ci-dessus.

Remarque : le fonctionnement des stations de pompage ne s'appuyant que sur l'anticipation, la définition d'un volume de consigne est inutile dans ce cas.

2.5 Action corrective

Le volume présent dans chacun des biefs est estimé à chaque pas de temps, et comparé au volume de consigne. Cet écart sera la grandeur d'entrée d'un contrôleur automatique qui déterminera les ajustements en débit à effectuer aux ouvrages de réglage.

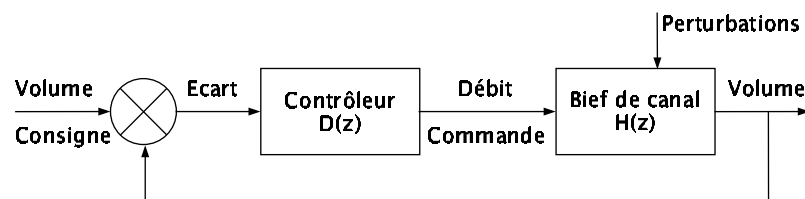


FIG. 2.3 – Principe de la boucle fermée

Classiquement, le contrôleur de la régulation dynamique est obtenu par une technique de placement de pôle [ÅW84] ; on peut cependant envisager de caler n'importe quel autre type de contrôleur. Nous expliciterons ici la méthode pour caler un contrôleur du troisième ordre.

Pour commencer, il est primordial de posséder un modèle du procédé à commander. Ensuite, après avoir choisi la forme générale du contrôleur, il est possible d'écrire la fonction de transfert du système en boucle fermée et d'en caler les coefficients.

2.5.1 Fonction de transfert du procédé

Nous considérons ici le procédé présenté sur la figure 2.4. Le bief de canal est considéré comme étant un système acceptant un débit en entrée, et donnant en sortie une estimation du volume d'eau présent.

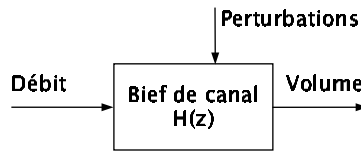


FIG. 2.4 – Procédé à commander

La fonction de transfert discrète modélisant ce procédé relie donc les variations de débit d'entrée aux variations de volume de sortie par un intégrateur filtré. Elle s'écrit :

$$\Delta V(z) = H(z)\Delta Q(z) \quad (2.15)$$

avec :

$$H(z) = \frac{K_P z^{-1}}{(1 - D_{1v} z^{-1})^2 (1 - z^{-1})} \quad (2.16)$$

et les coefficients suivants :

$$D_{1v} = e^{-\frac{2\pi T_e}{T}} ;$$

$$K_p = (1 - D_{1v})^2 \frac{T_e}{2} ;$$

T_e est la période d'échantillonnage ou pas de temps de régulation ;

T est la constante de temps du filtre et est de l'ordre de grandeur du pas de temps de régulation [Via01].

Les perturbations introduites sur la figure 2.4 ne sont évidemment pas décrites par la fonction de transfert. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de boucler le système avec un régulateur.

2.5.2 Fonction de transfert du contrôleur local

Le principe du contrôleur est illustré sur la figure 2.5. Le module de correction en boucle fermée, originellement fondé sur une correction proportionnelle intégrale (PI), a été amélioré et se trouve maintenant fondé sur une méthode de placement de

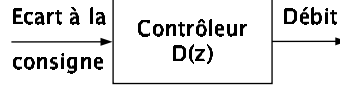


FIG. 2.5 – Contrôleur

pôles. Il est choisi du troisième ordre avec compensation du pôle double du modèle du procédé, et sa fonction de transfert est donnée par l'équation (2.17) :

$$D(z) = \frac{K_D (1 + N_1 z^{-1}) (1 - D_{1v} z^{-1})^2}{(1 + D_{1c} z^{-1} + D_{2c} z^{-2}) (1 - z^{-1})} \quad (2.17)$$

Les paramètres K_D , D_{1c} , D_{2c} et N_1 doivent être déterminés afin d'obtenir les performances et la robustesse désirées pour le système. Ces performances dépendent fortement des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée, qui s'écrit :

$$G(z) = \frac{K_P K_D z^{-1} (1 + N_1 z^{-1})}{(1 + D_{1c} z^{-1} + D_{2c} z^{-2}) (1 - z^{-1})^2 + K_P K_D z^{-1} (1 + N_1 z^{-1})} \quad (2.18)$$

L'équation (2.18) peut être mise sous forme canonique, faisant apparaître les deux pôles doubles P_1 et P_2 . $G(z)$ s'écrit alors :

$$G(z) = \frac{K_P K_D z^{-1} (1 + N_1 z^{-1})}{(1 - P_1 z^{-1})^2 (1 - P_2 z^{-1})^2} \quad (2.19)$$

Les pôles sont alors choisis de manière à assurer la stabilité et à obtenir les performances désirées pour le système. Selon les pratiques habituelles du placement de pôles, le premier pôle P_1 est fixé à une valeur très faible (0,1) qui n'influence pas la correction, tandis que le deuxième pôle P_2 est déterminé en fonction d'une constante de temps T_c appelée temps de correction :

$$P_2 = e^{-\frac{T_e}{T_c}} \quad (2.20)$$

Par identification des dénominateurs des équations (2.18) et (2.19), il est alors possible de déterminer les coefficients du contrôleur :

$$D_{2c} = P_1^2 P_2^2 \quad (2.21a)$$

$$D_{1c} = 2P_1^2 P_2^2 - 2(P_2 P_1^2 + P_1 P_2^2) \quad (2.21b)$$

$$K_D = \frac{2 - D_{1c} - 2(P_1 + P_2)}{K_P} \quad (2.21c)$$

$$N_1 = \frac{P_1^2 + P_2^2 + 4P_1 P_2 - D_{2c} + 2D_{1c} - 1}{K_P K_D} \quad (2.21d)$$

Un seul paramètre — le temps de correction T_c — est alors nécessaire pour caler *tous les coefficients* du contrôleur.

2.6 Paramètres de contrôle

Le nombre de paramètres qui permettent de contrôler la régulation dans son ensemble se trouve donc réduit à trois :

La fréquence d'échantillonnage est choisie d'après un compromis entre une fréquence d'ajustement des vannes pas trop élevée et la précision du contrôle.

Le temps de correction qui est fixé bief par bief après la simulation, d'après un compromis entre la performance et la robustesse.

Le coefficient de coordination. Comme explicité plus haut, l'action de coordination consiste à reporter de l'aval vers l'amont les différents débits de correction calculés pour chaque bief. Cela permet de diminuer l'amplitude de la correction à effectuer en anticipant sur celle-ci ; le processus est alors accéléré. Ce coefficient est fixé à une valeur comprise entre 70 % et 100 %. Pour des canaux avec une capacité de stockage importante, un coefficient de 80 % est recommandé. À l'inverse, pour des canaux présentant une capacité de stockage réduite, ce coefficient doit être plus grand et peut atteindre 100 %.

2.7 Commentaires sur la régulation dynamique

Après une trentaine d'années de mise en application, les principaux points forts de la régulation portent sur les aspects décrits ci-dessous [SDS02].

Coordination des opérations sur le canal. Les modifications des débits qui résultent des ajustements successifs sont cumulées de l'aval vers l'amont et sont prises en compte avant qu'elles aient pu avoir un effet significatif sur les volumes des biefs et des réservoirs. Le temps de réponse du système est ainsi diminué.

Simplicité et fiabilité du logiciel. Le modèle de simulation inclus dans le programme n'intègre pas les équations de Saint Venant ; il utilise plutôt des tables pré-calculées pour estimer les temps de propagation et les volumes. Ces tables sont établies lors de la phase de conception à l'aide d'un logiciel résolvant les équations de S^t Venant. L'imprécision relative due à cette simplification est compensée par la robustesse opérationnelle et par les corrections provenant de la commande en boucle fermée.

Commande en débit. Les réglages aux ouvrages de réglage sont calculés *a posteriori* afin de simplifier la synthèse. Des relations non-linéaires telles que des lois ouverture – débit aux vannes ne sont donc pas intégrées dans le contrôleur.

Prise en considération des conditions opératoires. Le logiciel a été développé initialement selon les spécifications propres au canal de Provence par une équipe multidisciplinaire d'informaticiens, d'hydrauliciens, de spécialistes des réseaux, et de personnel d'exploitation. Il a été progressivement adapté pour prendre en

considération les modifications demandées par les opérateurs. Lors de l'installation sur des systèmes de transport d'eau, une étude est préalablement effectuée, durant laquelle les spécifications opératoires sont définies. La SCP supervise alors l'installation de l'équipement et vérifie que les différents éléments sont compatibles. Elle assure la formation des opérateurs et fournit l'aide à la mise en œuvre du système.

Notons que la description qui est faite du système de régulation dans ce chapitre est la plus générale. On peut trouver en certains points du canal des mises en œuvre spécifiques de certaines méthodes de régulation. Citons pour exemple la branche de Trets caractérisée par une tête morte très longue et un faible volume de stockage sur laquelle a été implémenté un prédicteur de Smith afin de prendre en compte ces particularités [VDSS03].

Comme on peut le voir, la régulation dynamique est un système complet de gestion d'un canal de transport d'eau à usages multiples. L'approche monovariante du contrôleur rend cependant difficile l'optimisation du système. L'intégration d'une commande multivariante permettrait d'englober toutes les contraintes de fonctionnement du système, et d'avoir ainsi une approche globale de la commande. Ce travail se situe donc dans ce contexte, et décrit l'intégration d'une commande multivariante sur une des branches du canal de Provence.

Chapitre 3

Le système à commander

Sommaire

3.1	Introduction	39
3.2	La branche d'Aix Nord	40
3.3	Commandes, mesures, consignes et perturbations	41
3.4	Les contraintes	42
3.5	La modélisation du système	43
3.5.1	Le modèle non-linéaire	44
3.5.2	Le modèle linéaire	45
3.6	Identification des dynamiques	47
3.6.1	Dynamique débit amont – débit aval	47
3.6.2	Dynamique débit – volume	54
3.7	Le modèle multivariable	54

3.1 Introduction

Le but de ce travail est de tester un contrôleur multivariable sur une branche de canal existante. Nous avons choisi pour cela un système dont les caractéristiques sont intéressantes pour pouvoir expérimenter ce type de commande. Notre choix s'est porté sur la branche d'Aix Nord du canal de Provence pour la multiplicité d'ouvrages de types différents que l'on y trouve, et pour les contraintes d'exploitation qui s'y appliquent.

Nous verrons dans ce chapitre une description détaillée de la branche d'Aix Nord, avec toutes les variables disponibles pour la commande et la mesure. Nous terminerons avec l'identification des dynamiques et la construction du modèle multivariable.

3.2 La branche d'Aix Nord

La branche d'Aix Nord prend naissance à Venelles au nord d'Aix en Provence, prenant la suite de la branche de Bimont et s'étendant à travers la chaîne de la Trévaresse jusqu'à Lambesc. Cette branche comporte un canal de 10 km de long, neuf réserves, cinq stations de pompage et un surpresseur.

Le départ de la branche se trouve à l'aval de la cuvette de Saint Hippolyte où l'on trouve en dérivation l'alimentation de l'usine de potabilisation de Saint Eutrope qui alimente la ville d'Aix en Provence, la station de pompage de S^t Hippolyte qui alimente les réserves de S^t Canadet, des Pinchinats et de Bibemus, et le surpresseur de S^t Hippolyte qui alimente l'aval de la branche lorsque le débit gravitaire ne suffit plus. On trouve ensuite la réserve d'Eguilles et la station de pompage de Puyricard qui alimente les réserves de Ganay et Dupail. Vient ensuite le bassin de régulation de Puyricard, à l'intérieur duquel le niveau d'eau commande la mise en marche du surpresseur puis le canal de la Trévaresse, départ du réseau qui nous intéressera dans la suite de ce travail (cf. figure 3.1).

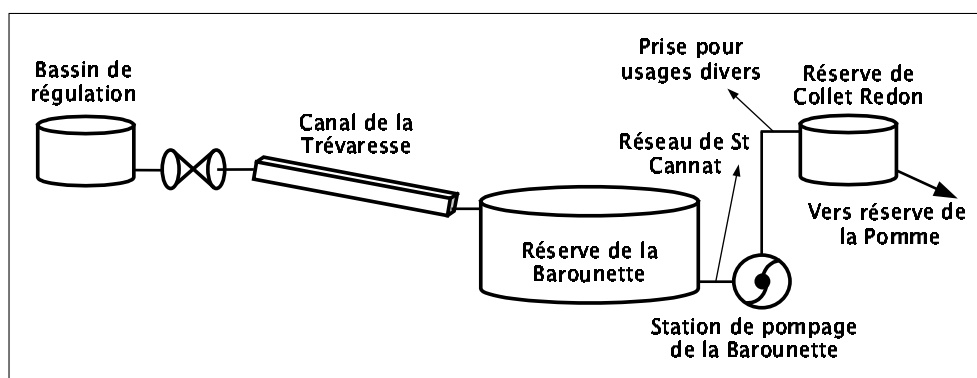


FIG. 3.1 – *Système étudié*

Le débit dans le canal de la Trévaresse est commandé par une vanne en sortie du bassin de régulation. Ce canal, qui faisait partie des ouvrages du Verdon construit en 1877, a été récemment modernisé par un revêtement en béton et par la construction d'une série de seuils en bec de canard destinés à diminuer le temps de transit entre le bassin de régulation et la réserve de la Barounette située à l'aval. À partir de cette réserve de 13 400 m³, la station de pompage de la Barounette remonte l'eau jusqu'à la réserve de Collet Redon d'une capacité de 8 500 m³. Vient ensuite la station de pompage de La Pomme qui alimente la réserve de Janet — ces deux derniers ouvrages ne feront pas partie du système étudié.

En 2003, il est passé 17,7 Mm³ à l'aval du surpresseur, réparties en 1,8 Mm³ pour l'usage des communes à des fins de potabilisation, et 15,9 Mm³ pour un usage rural — irrigation, usages divers... Le tableau 3.1 donne l'évolution des débits et volumes au surpresseur de Saint Hippolyte pendant l'année 2003.

TAB. 3.1 – Débits et volumes mensuels à la sortie du surpresseur

Mois	Débit max. l/s	Débit moyen l/s	Volume $\times 1\,000\text{ m}^3$
Janvier	600	240	628,2
Février	380	155	335,0
Mars	870	275	665,9
Avril	2130	310	759,5
Mai	2435	710	1778,6
Juin	2425	1365	3391,0
Juillet	2510	1560	4349,0
Août	2310	1250	3324,0
Septembre	1570	380	1084,0
Octobre	945	265	749,0
Novembre	610	150	313,0
Décembre	635	145	319,0

3.3 Commandes, mesures, consignes et perturbations

Nous nous attacherons désormais à étudier le système compris entre le bassin de régulation de Puyricard et la réserve de Collet Redon. Les variables dont nous disposons pour gérer cet ensemble d'ouvrages sont les suivantes :

Variables de commande :

- commande en débit de la vanne de sortie du bassin de régulation de Puyricard ;
- commande de mise en route des pompes à la station de pompage de la Barounette — 4 pompes.

Variables mesurées :

- débit à l'amont du canal de la Trévaresse ;
- débit à l'aval du canal de la Trévaresse ;
- niveau dans la réserve de la Barounette ;
- débit à la sortie de la réserve de la Barounette ;
- niveau dans la réserve de Collet Redon ;
- débit à la sortie de la réserve de Collet Redon, vers la réserve de la Pomme.

Variables contrôlées :

- volume dans la réserve de la Barounette ;

- volume dans la réserve de Collet Redon.

Perturbations :

- ruissellement ou fuite sur le canal de la Trévaresse ;
- départ vers les réseaux de S^t Cannat à l'amont immédiat de la station de pompage de la Barounette ;
- prise pour usages divers à l'aval de la station de pompage ;
- débit en sortie de la réserve de Collet Redon, vers la réserve de la Pomme.

3.4 Les contraintes

Les contraintes que l'on pourra essayer d'inclure dans ce type de commande sont nombreuses. Il est possible d'en définir plusieurs types, bien que certaines puissent se trouver dans l'un ou dans l'autre :

contraintes énergétiques, portant sur le fonctionnement des appareillages électriques — optimisation des coûts de pompage et de turbinage ;

contraintes de fonctionnement, qui peuvent être liées à la géométrie du système — niveaux maximum, minimum, etc. — à la manière dont il doit être géré pour assurer les fonctions qui lui sont données — consignes, etc. — ou encore la manière de gérer le système dans les cas où la ressource n'est pas maîtrisée — cas du King Abdullah Canal en Jordanie, avec prise directe en rivière ;

contraintes de sécurité, qui peuvent traduire par exemple la nécessité de conserver un volume de sécurité dans les réserves, assurant l'alimentation en cas de demande imprévue ou d'incident sur le réseau.

Pour l'application présentée dans ce travail, nous nous bornerons à essayer de traiter les contraintes énergétiques et les contraintes de fonctionnement.

Nous allons dans la suite décrire le fonctionnement de la branche, en mettant en évidence les différentes contraintes. La première partie du système est constituée par le canal de la Trévaresse. La capacité de transit de cet ouvrage est de 1 500 l/s. De plus, afin de ne pas vider le canal — temps de remise en eau très important — il est nécessaire de maintenir un débit minimum de 30 l/s. Cela définit deux premières contraintes de fonctionnement. Vient ensuite la réserve de la Barounette, où il faut bien sûr se garder de dépasser la cote maximum. Actuellement, la consigne est fixée à 9 000 m³, mais il est envisageable de la rendre variable avec les conditions de fonctionnement.

L'ouvrage dont le fonctionnement est le plus complexe et demande le plus d'attention est certainement la station de pompage de la Barounette. Cette station est constituée de quatre pompes en parallèle, fonctionnant en tout ou rien, indépendamment les unes des autres. Chacune des deux réserves amont et aval ont une influence sur le fonctionnement de la station. Pour la Barounette, il existe quatre niveaux bas interdisant la mise en route de plus de 3, 2, 1 ou 0 pompes. Pour Collet Redon, afin d'éviter tout risque de débordement, on s'assure que, en l'absence de tout

prélèvement, la réserve pourra accepter le débit que fournira la station pendant un pas de temps de régulation (15 minutes). En plus de tous ces critères, il existe des contraintes liées à la tarification de l'électricité.

Il existe trois périodes agricoles différentes :

1. Pointe agricole du 1^{er} avril au 31 octobre ;
2. Hiver, du 1^{er} décembre au 28 février ;
3. Hors point agricole du 1^{er} au 30 novembre et du 1^{er} au 31 mars.

En fonction de la période, les tarifs EDF varient pendant la journée :

1. En pointe agricole, il existe deux tarifs correspondant aux heures pleines (de 6^h30 à 22^h30) et aux heures creuses ;
2. En hiver, un tarif heure de pointe vient s'ajouter aux deux précédents (de 9^h à 11^h et de 18^h à 20^h) ;
3. En période hors pointe agricole, les deux plages heures pleines et heures creuses existent avec les mêmes horaires mais avec des tarifs légèrement supérieurs à ceux de la pointe agricole.

Compte tenu de ce découpage, le prix de l'électricité peut varier d'une période à l'autre dans un rapport de 1 à 4 tout au long de l'année.

Les puissances souscrites par contrat à EDF sont différentes en fonction de la période, ce qui implique qu'il existe un nombre maximum de pompe qu'il est possible de mettre en route simultanément et qui, de plus, varie dans l'année. Il peut même arriver qu'il ne soit pas possible de mettre en route ne serait-ce qu'une seule pompe.

Enfin, il reste au bout de la chaîne, la réserve de Collet Redon pour laquelle il existe un volume haut (7 700 m³) et un volume bas (4 000 m³). La station de pompage de la Barounette fonctionne de manière à essayer d'atteindre le niveau haut à la fin de la période heure creuse. Pendant la période heure pleine, un calcul de volume est mené, et en fonction des prévisions, s'il est prévu de passer en dessous du niveau bas, une pompe est mise en route. Une nouvelle simulation est alors faite, et si le débit fourni par la première pompe n'est pas suffisant pour maintenir le niveau au-dessus de la limite, une deuxième pompe est mise en route...

3.5 La modélisation du système

Nous avons besoin d'un modèle du système à plusieurs titres, le type de modèle étant déterminé par l'utilisation que l'on veut en faire. On distingue deux grandes classes de modèles :

Les modèles de connaissance, basés sur les lois de la physique. Les paramètres qui y interviennent sont dit *réifiables*, c'est à dire que leurs valeurs peuvent être reliées à des éléments physiquement mesurables. De tels modèles sont riches en informations sur le comportement statique et dynamique du système, et leur domaine de validité est large. Cependant, ils sont la plupart du temps basés sur des équations aux dérivées partielles ne comportant pas de solutions analytiques connues. Leur mise en œuvre en est donc rendue très lourde.

Les modèles de représentation, basés sur des représentations mathématiques de type *boite noire*. Les paramètres utilisés ne sont pas réifiables, c'est à dire qu'ils ne sont pas reliés entre eux par des lois physiques connues. Leur principal avantage est leur simplicité de mise en œuvre et d'identification. Par contre leur domaine de validité est réduit.

Comme le fait remarquer Malaterre [Mal94], la distinction entre les deux classes de modèles peut devenir floue. Ainsi dans un modèle de connaissance, les simplifications nécessaires conduisent parfois à des paramètres non réifiables. C'est le cas du coefficient de Manning – Strickler dans les modèles numériques de S^t Venant, qui devient alors un paramètre de calage et doit être ajusté par des mesures sur le système réel. De la même manière, un modèle de représentation nécessite souvent la connaissance physique du système.

Pour effectuer la synthèse du contrôleur, nous devons tout d'abord disposer d'un modèle linéaire représentant le système à un point de fonctionnement donné. Ce modèle devra dépendre, dans la mesure du possible, de paramètres physiques 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, ces tests ne pouvant pas être effectués sur les ouvrages réels. Nous mettrons en œuvre pour cela un modèle non-linéaire des équations de S^t Venant.

3.5.1 Le modèle non-linéaire

Nous avons utilisé le logiciel SIC (Simulation of Irrigation Canal) pour créer un modèle non linéaire de la branche d'Aix Nord. C'est un logiciel développé par le CEMAGREF qui résout les équations de S^t Venant suivant un schéma aux différences finies de Preissmann (sur SIC, voir [SICa] et [SICb] ou <http://www.cemagref.net> ; sur le schéma de Preissmann, voir [CHV80] ou [Mal94]). SIC est capable de modéliser des systèmes maillés et ramifiés, en régime permanent et transitoire. Il est en outre possible d'y inclure des modules de régulation permettant de tester les contrôleurs développés sur le système modélisé. Il nécessite une description complète de tous les paramètres physiques du système : géométrie du canal, des ouvrages de régulation, lois hauteur – surface des réserves, description des prises...

Description géométrique

Le canal de la Trévaresse, d'une longueur de 10,7 km peut, d'un point de vue hydraulique, être séparé en deux. La partie amont — pente moyenne de $3 \cdot 10^{-4}$ m/m — est séparée de la partie aval — pente moyenne de $6 \cdot 10^{-4}$ m/m — par un coursier torrentiel de 3,8 m de chute. La section type est rectangulaire, d'une largeur de 2 m et d'une hauteur de 1,5 m dans la partie amont et de 1,3 m dans la partie aval.

Description hydraulique

Le canal comporte un seuil de mesure à chacune de ses extrémités. Celui situé à l'amont a une largeur de 2 m, tandis que le seuil aval est oblique et fait 15 m de long. Ce dernier est à l'origine un seuil de régulation qui a été instrumenté par la suite. De plus, six seuils en bec de canard ont été construits afin de diminuer le temps de transit du canal. Ces seuils ont une longueur déversante de 16 m. Le modèle a été calé par des mesures de terrain ; le coefficient de Strickler adopté est de 63, ce qui correspond à un béton légèrement rugueux.

Le logiciel SIC ne pouvant pas gérer les écoulements torrentiels excepté aux sections singulières — avec des lois hauteur – débit particulières — le coursier est modélisé par une chute verticale avec un seuil sur la section amont. Ce seuil est calé à quelques centimètres au dessus du radier, de manière à conserver une hauteur d'eau minimum aux faibles débits dans le bief amont. Son impact est, dans la pratique, négligeable sur le comportement global du canal.

Les réserves sont modélisées par des *casiers* décrits par des lois hauteur – surface permettant de reconstituer les lois hauteur – volume présentées dans la base de données de la régulation.

Il est nécessaire d'utiliser un artifice de modélisation pour la station de pompage car cet organe n'existe pas dans SIC. Entre les deux réserves, le réseau est fermé par une vanne en travers. Deux prises situées de chaque côté de cette vanne permettront de prélever l'eau à l'amont pour l'injecter à l'aval, simulant ainsi le fonctionnement des pompes. De plus, toute la partie du réseau en charge située à l'aval de la station de pompage est modélisée par des biefs de canal très courts pour ne pas présenter de retard ni de volume de stockage.

Paramètres numériques

Le pas d'espace du schéma numérique est au maximum de 200 m, le pas de temps sera en général pris égal à 60 s. La condition initiale est donnée par une ligne d'eau calculée en régime permanent. La première condition aux limites est donnée par le débit que l'on règle à l'amont. Pour la seconde située à l'aval, le canal est fermé par un casier de section nulle, ce qui laisse la cote évoluer de façon libre sans induire de stockage ou de déstockage d'eau.

3.5.2 Le modèle linéaire

Ce modèle est utilisé pour la synthèse du contrôleur. Nous l'exprimerons ici en terme de fonction de transfert, décrivant l'évolution d'une grandeur de sortie par rapport à une grandeur d'entrée. Le système est ici multivariable, c'est à dire qu'il possède plusieurs entrées — les commandes et les perturbations — et plusieurs sorties — les variables mesurées et contrôlées.

Nous utiliserons par la suite les notations suivantes :

- Les commandes seront notées u_i . Elles sont au nombre de deux :
 - le débit amont du canal de la Trévaresse est noté u_1 ,
 - le débit à la station de pompage de la Barounette est noté u_2 ;
- Les mesures seront notées z_i . On en compte quatre :
 - le débit aval du canal de la Trévaresse est noté z_1 ,
 - le volume¹ dans la réserve de la Barounette est noté z_2 ,
 - le débit à la sortie de la réserve de la Barounette est noté z_3 ,
 - le volume dans la réserve de Collet Redon est noté z_4 ;
- Les variables contrôlées seront notées y_i , elles sont au nombre de deux :
 - le volume dans la réserve de la Barounette, noté y_1 ,
 - le volume dans la réserve de Collet Redon, noté y_2 ;

on a ici les égalités suivantes : $y_1 = z_2$ et $y_2 = z_4$;

- Enfin, les perturbations seront notées w_i et sont au nombre de quatre :
 - le débit de ruissellement ou de fuite dans le canal est noté w_1 ,
 - le débit vers les réseaux de S^t Cannat est noté w_2 ,
 - le débit de la prise pour usages divers est noté w_3 ,
 - le débit de sortie de la réserve de Collet Redon est noté w_4 ;

seule cette dernière perturbation est connue car mesurée. Précisons de plus que ces quantités seront *négligables* dans le cas d'un *prélèvement*.

On peut identifier trois dynamiques différentes à l'intérieur du système global, associées à trois fonctions de transfert différentes :

- la première dynamique qui donne le débit à l'aval du canal de la Trévaresse en fonction du débit à l'amont est notée F_1 ;
- la deuxième qui donne le volume dans la réserve de la Barounette en fonction de la somme algébrique des débits d'entrée et de sortie est notée F_2 ;
- la troisième est identique à la précédente mais pour la réserve de Collet Redon, et est notée F_3 .

En faisant l'hypothèse que les perturbations en débit dans le canal de la Trévaresse w_1 sont appliquées à l'amont et sont donc soumises à la même dynamique que

1. Nous travaillerons ici directement sur le volume dans les réserves, alors qu'en réalité, la mesure est effectuée sur la *hauteur d'eau* dans la réserve, le volume est ensuite calculé par interpolation dans une table.

la commande u_1 , on peut exprimer les sorties en fonction des entrées et écrire :

$$\begin{cases} z_1 = F_1(u_1 + w_1) \\ z_2 = F_2(z_1 - z_3) = F_2(F_1(u_1 + w_1) - u_2 + w_2) \\ z_3 = u_2 - w_2 \\ z_4 = F_3(u_2 - w_3 + w_4) \\ y_1 = z_2 \\ y_2 = z_4 \end{cases} \quad (3.1)$$

ou en détaillant la matrice de transfert entrée – sortie :

$$G = \begin{pmatrix} G_{yu} & G_{yw} \\ G_{zu} & G_{zw} \end{pmatrix} = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & w_1 & w_2 & w_3 & w_4 \\ y_1 & \begin{pmatrix} F_1 F_2 & -F_2 & F_1 F_2 & F_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ y_2 & \begin{pmatrix} 0 & F_3 & 0 & 0 & F_3 & F_3 \end{pmatrix} \\ z_1 & \begin{pmatrix} F_1 & 0 & F_1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ z_2 & \begin{pmatrix} F_1 F_2 & -F_2 & F_1 F_2 & F_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ z_3 & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ z_4 & \begin{pmatrix} 0 & F_3 & 0 & 0 & F_3 & F_3 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3.2)$$

3.6 Identification des dynamiques

Les dynamiques énoncées ci-dessus sont au cœur du modèle. Ce sont elles qui sont chargées de représenter le comportement réel du système, elle doivent donc être suffisamment proches de la réalité.

3.6.1 Dynamique débit amont – débit aval

Les données d'identification sont obtenues à l'aide du modèle non-linéaire. On introduit à l'amont un Signal Binaire Pseudo Aléatoire (SBPA) centré sur un débit moyen de 700 l/s, et on récupère en sortie le débit à l'aval du canal de la Trévarresse (cf. figure 3.2). Ces deux signaux serviront de données de référence pour l'identification. Un SBPA se présente comme une succession d'impulsions rectangulaires modulées en largeur, qui approximent un bruit blanc discret et qui ont donc un contenu riche en fréquences ([Lan93] p.298).

Trois solutions d'identification ont ici été retenues :

1. Identification d'un modèle ARX [Lju87]. Les ordres des numérateurs et dénominateurs ainsi que le retard pur sont, soit fixés par l'utilisateur, soit calculés par l'algorithme d'identification ;
2. Approximation du modèle d'Hayami par une fonction de transfert du second ordre avec retard [Mal94] [Lit99] ;
3. Identification par une fonction de transfert d'ordre deux avec retard et un pôle double [Del88].

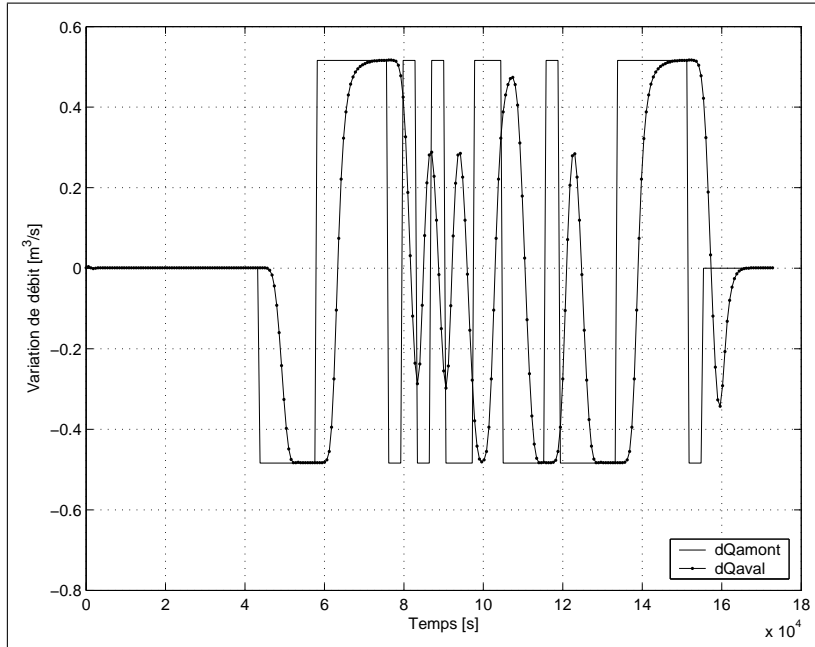


FIG. 3.2 – Signaux pour l'identification

Afin de comparer ces trois fonctions de transfert, nous présenterons ensuite leurs réponses fréquentielles et nous les comparerons à la réponse du transferts débit amont – débit aval donné par linéarisation des équations de S^t Venant.

Identification d'un modèle ARX

L'identification consiste ici à introduire les signaux d'entrée et de sortie dans un programme qui calculera la fonction de transfert du procédé en optimisant si on le désire l'ordre du numérateur, du dénominateur, et le retard pur. Pour ne pas obtenir une fonction de transfert trop complexe, on se limitera ici à un ordre deux au numérateur et au dénominateur. Le retard pur calculé par le programme dépend du débit de fonctionnement choisi pour la linéarisation. Il est de six pas de temps pour une période d'échantillonnage de 600 secondes et un débit moyen de 700 l/s.

$$F_{arx}(z) = \frac{0,04819 + 0,04328z^{-1} + 0,0392z^{-2}}{1 - 1,364z^{-1} + 0,502z^{-2}} z^{-6} \quad (3.3)$$

La figure 3.3 compare le débit aval calculé par le modèle non-linéaire avec celui donné par la fonction de transfert identifiée — modèle linéaire. Les résultats sont satisfaisants même avec un ordre deux. On peut cependant reprocher à ce type d'identification *boite noire* d'être trop loin de la réalité physique du système. Il est en effet impossible de rapprocher les différents coefficients du numérateur et du dénominateur d'une quelconque grandeur représentative du canal. Il faut donc prévoir

une fonction de transfert différente pour chacun des points de fonctionnement prévus pour le système, dont rappelons-le, le débit amont peut varier de 30 l/s à 1 500 l/s.

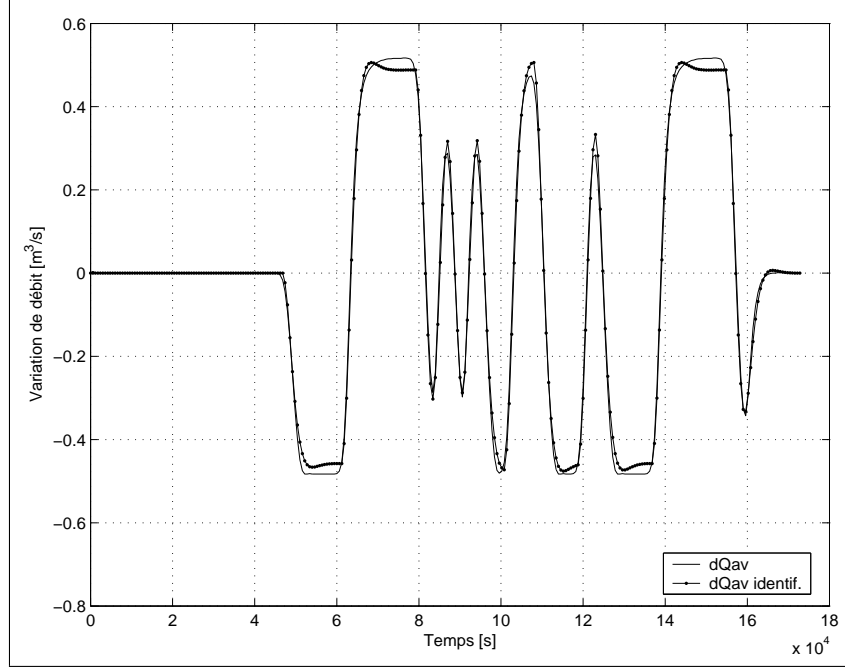


FIG. 3.3 – Débit aval donné par le modèle ARX

Approximation du modèle d'Hayami

En linéarisant l'équation de transport – diffusion (2.6) autour d'un débit de référence, nous pouvons considérer la célérité Θ et le coefficient de diffusion E comme constants. On obtient alors l'équation d'Hayami :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \Theta \frac{\partial Q}{\partial x} - E \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (3.4)$$

Dans le cas particulier d'un canal de longueur L , à section rectangulaire et en régime uniforme, on peut exprimer la relation entre débit amont et débit aval sous la forme d'une fonction de transfert après transformation de Laplace :

$$F_{Hayami}(s) = \exp \frac{\Theta - \sqrt{\Theta^2 + 4Es}}{2E} L \quad (3.5)$$

Cette fonction de transfert est d'ordre infini, c'est à dire qu'elle n'est pas décomposable dans une base d'ordre fini. Il est cependant possible de l'identifier à une

fonction de transfert du second ordre avec retard dont l'étude est un exercice classique de l'automatique :

$$F_H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} e^{-rs} \quad (3.6)$$

où :

ω_n est la pulsation propre du système ;

ξ est le coefficient d'amortissement ;

r est le retard pur.

On trouvera dans [Mal94] une application de la méthode des moments sur l'identification de la fonction de transfert d'Hayami, qui permet de calculer la pulsation propre, le coefficient d'amortissement et le retard pur. Dans le cas du canal de la Trévaresse, on trouve les coefficients présentés sur le tableau 3.2, ce qui donne le

TAB. 3.2 – Paramètres de la fonction de transfert d'Hayami

ω_n	ξ	r
$2,46 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	0,95	5 860 s

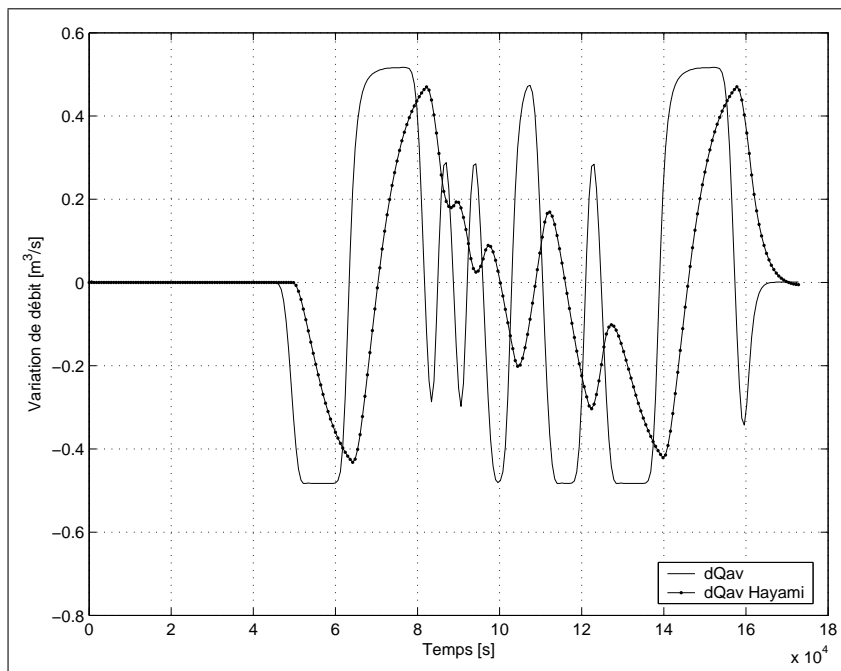


FIG. 3.4 – Débit aval donné par identification du modèle d'Hayami

résultat montré sur la figure 3.4. Comme on peut le constater, la fonction de transfert identifiée est lente par rapport à la réponse réel du canal. En effet, le modèle

d'Hayami prend comme hypothèse que le canal fonctionne en régime uniforme. Or la présence d'ouvrages de régulation type bec de canard engendrent des courbes de remous mais en plus — et c'est leur rôle — accélèrent la réponse du canal en diminuant le temps de transit. Il est donc normal que malgré le fait d'avoir moyenné les données pour le calcul des coefficients de la fonction de transfert, le résultat soit plus lent que la réponse du canal.

Fonction de transfert d'ordre deux avec retard et un pôle double

La troisième solution consiste à fixer la forme de la fonction de transfert et à identifier les coefficients à l'aide de paramètres physiques. Deltour [Del88] propose de représenter le transfert débit amont – débit aval par une fonction de transfert d'ordre deux avec retard et possédant un pôle double :

$$F_{QQ}(z) = \frac{N}{(1 - Dz^{-1})^2} z^{-r} \quad (3.7)$$

avec $D = e^{-\frac{T_e}{T}}$ et $N = (1 - D)^2$. T_e est la période d'échantillonnage, r est le retard pur en nombre de pas de temps et T est une constante de temps caractéristique de la réponse du système à une entrée échelon. On peut relier ces deux grandeurs au temps de retard hydraulique du bief $\frac{\Delta V}{\Delta Q}$ par la relation (cf. figure 3.5) :

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = T + rT_e \quad (3.8)$$

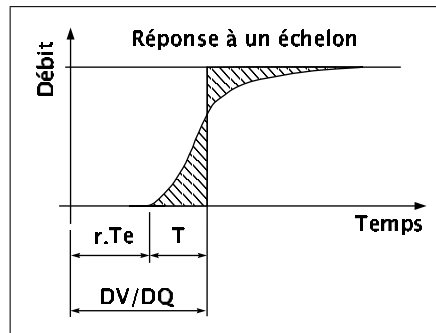


FIG. 3.5 – Temps caractéristiques du canal

Le retard pur est le temps mis par une petite perturbation de débit pour se propager le long du canal. Il est donné par la relation suivante où v est la vitesse de l'écoulement et L est la longueur du canal :

$$rT_e = \frac{L}{v + \sqrt{\frac{gA}{B}}} \quad (3.9)$$

Le retard hydraulique dépend du débit de fonctionnement du canal. Il est calculé *a priori* pour le bief considéré. Cela fait partie des valeurs que l'on trouve dans la base de données de la régulation dynamique. Finalement, la constante de temps T est calculée par la différence entre le retard hydraulique et le retard pur : $T = \frac{\Delta V}{\Delta Q} - rT_e$. Pour le canal de la Trévarresse, on trouve pour un pas de temps d'échantillonnage T_e de 600 secondes les valeurs suivantes :

TAB. 3.3 – Constantes de temps pour la Trévarresse

Q [l/s]	$\frac{\Delta V}{\Delta Q}$ [s]	r	T [s]
200	5090	7	890
700	5300	6	1700
1200	6100	5	3100

La figure 3.6 montre la réponse de cette fonction de transfert à une entrée de type SBPA centrée autour d'un débit de 700 l/s. La sortie calculée est très proche

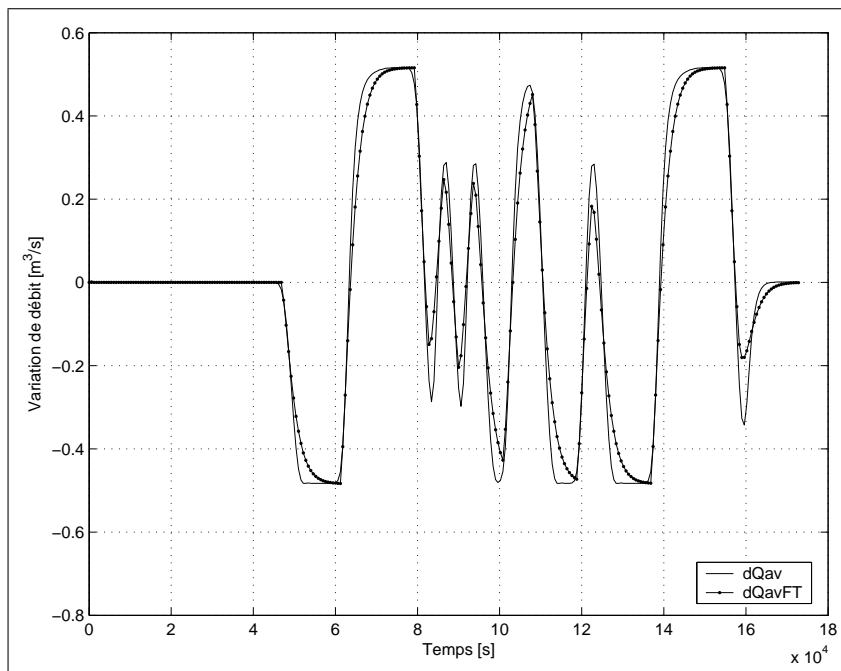


FIG. 3.6 – Débit aval donné par la fonction de transfert débit – débit

de la réponse réelle du canal.

Remarque : Il n'est présenté ici que la réponse de la fonction de transfert telle qu'elle est calculée pour un débit moyen de 700 l/s. On pourra constater que cette réponse est meilleure pour des débits plus faibles, mais légèrement trop lente pour

des débits supérieurs.

Linéarisation des équations de Saint Venant

Il est possible de linéariser les équations de S^t Venant défini par (2.2) et (2.3) autour d'un régime quelconque stationnaire [LF02]. La transformation de Laplace permet de transformer ce système en une équation différentielle ordinaire en x , paramétrée par la variable de Laplace s . Cette méthode, purement numérique, nous permet d'obtenir la réponse fréquentielle du transfert entre le débit amont, le débit aval, et la cote de l'eau en un point spécifié. La réponse ainsi obtenue est présentée sur le diagramme de Bode 3.7, et comparée aux réponses des fonctions précédentes. L'approximation du modèle d'Hayami est logiquement loin de la réponse du modèle

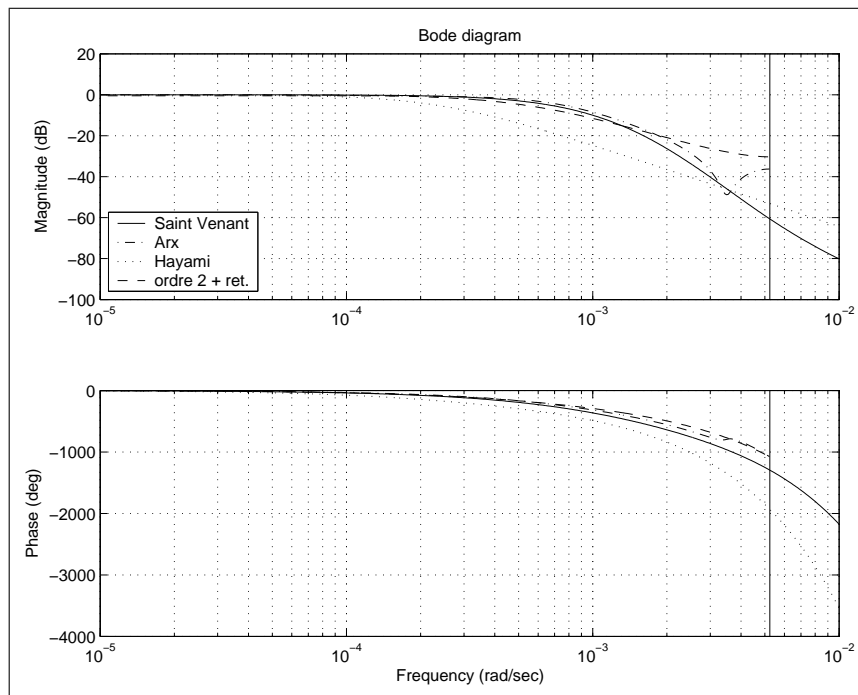


FIG. 3.7 – Diagramme de Bode des différents modèles

de S^t Venant, tandis que les autres courbes sont plus proches. Les comportements des modèles ARX et second ordre avec retard sont similaire au comportement du modèle obtenu par linéarisation de S^t Venant, pour des fréquences inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ rad.s⁻¹ — fréquence principale du SBPA servant à l'identification.

Conclusion

Nous avons testé ici trois méthodes différentes pour obtenir un modèle linéaire du canal de la Trévaresse qui nous servira à synthétiser le contrôleur. La troisième

méthode, qui consiste à choisir la forme de la fonction de transfert et à identifier les paramètres à l'aide des constantes de temps du système, est intéressante à plusieurs titres. Tout d'abord la simplicité de sa forme est très attrayante. Ensuite, le fait de pouvoir caler les deux seuls paramètres à l'aide de constantes physiques est également intéressant ; la compréhension de la dynamique en est ainsi plus aisée. Pour finir, les performances plus qu'honorables de cette fonction de transfert, font que notre choix se portera sur ce modèle linéaire pour toute la suite de ce travail lorsqu'il s'agira de représenter un transfert débit amont – débit aval dans le canal de la Trévaresse.

3.6.2 Dynamique débit – volume

La deuxième dynamique présente dans le modèle d'Aix Nord est le remplissage des réservoirs. L'identification sera ici beaucoup plus simple, puisque la dynamique est très bien connue et ne présente aucun temps de retard. La variation du volume dans une réserve est directement l'intégrale de la somme algébrique des débits entrants et sortants :

$$V(t) = \int_{t_0}^t (Q_{entrant}(t) + Q_{sortant}(t)) dt + V(t = t_0) \quad (3.10)$$

ou encore en variables discrètes et en utilisant la méthode des trapèzes pour intégrer :

$$V_t = V_{t-T_e} + \frac{Q_t + Q_{t-T_e}}{2} T_e \quad (3.11)$$

ce qui donne la fonction de transfert suivante, liant la sortie (volume) à l'entrée (débit) :

$$F_{QV}(z) = \frac{T_e}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.12)$$

Cette fonction de transfert, dont l'ordre du numérateur est égal à l'ordre du dénominateur, n'est pas strictement causale. Effectivement, la méthode d'intégration par les trapèzes implique qu'il faut connaître le débit au temps t pour calculer le volume au même instant. Classiquement, il est préférable en automatique de traiter des systèmes strictement causaux. Dans le cas où cela nous poserait un problème par la suite, nous pourrions nous tourner vers une méthode d'intégration par des rectangles qui permettrait de faire dépendre le volume uniquement du débit à l'instant précédent.

3.7 Le modèle multivariable

Pour reprendre les notations de l'expression (3.2), la fonction d'ordre deux avec retard modélisant le transfert débit – débit est noté F_1 , et l'intégrateur modélisant le transfert débit – volume est noté F_2 . On considérera ici que les transferts débit – volume sur les deux réserves sont identiques et sont donc représentés par la même fonction. Les figures 3.8 à 3.11 montrent les réponses indicielles des différentes composantes du système global G défini par la relation (3.2).

La commande optimale que l'on se propose de mettre en œuvre dans la suite de ce travail est une commande par retour d'état. Il faut donc disposer d'une représentation d'état du système à commander. Cette représentation n'est pas unique. Pour la synthèse du contrôleur, nous disposerons d'un modèle d'état calculé à partir d'un programme adapté. Pour la commande du système réel, ou du moins pour la commande du simulateur, nous devons disposer d'un observateur d'état, capable de reconstruire l'état du système à l'aide des mesures disponibles. Un modèle d'état s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} X^+ &= A_s X + B_s U \\ Y &= C_s X + D_s U \end{cases} \quad (3.13)$$

où X et X^+ sont les vecteurs d'état aux instants t et $t + T_e$, $U = \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix}$ est le vecteur des entrées, et $Y = \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}$ le vecteur des sorties. Les matrices du système dynamique A_s , B_s , C_s et D_s seront dans la suite décomposées de la manière suivante en fonction des variables sur lesquelles elles s'appliquent :

$$\begin{aligned} B_s &= \begin{bmatrix} B_u & B_w \end{bmatrix} \\ C_s &= \begin{bmatrix} C_y \\ C_z \end{bmatrix} \\ D_s &= \begin{bmatrix} D_u & D_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{yu} & D_{yw} \\ D_{zu} & D_{zw} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Si on note nx , nu , nw , ny , nz respectivement le nombre d'états, de commandes, de perturbations, de grandeurs contrôlées et de mesures, on a les dimensions du tableau 3.4 pour les matrices.

TAB. 3.4 – Dimensions des matrices dynamiques

A_s	$nx \times nx$
B_s	$nx \times (nu + nw)$
C_s	$(ny + nz) \times nx$
D_s	$(ny + nz) \times (nu + nw)$

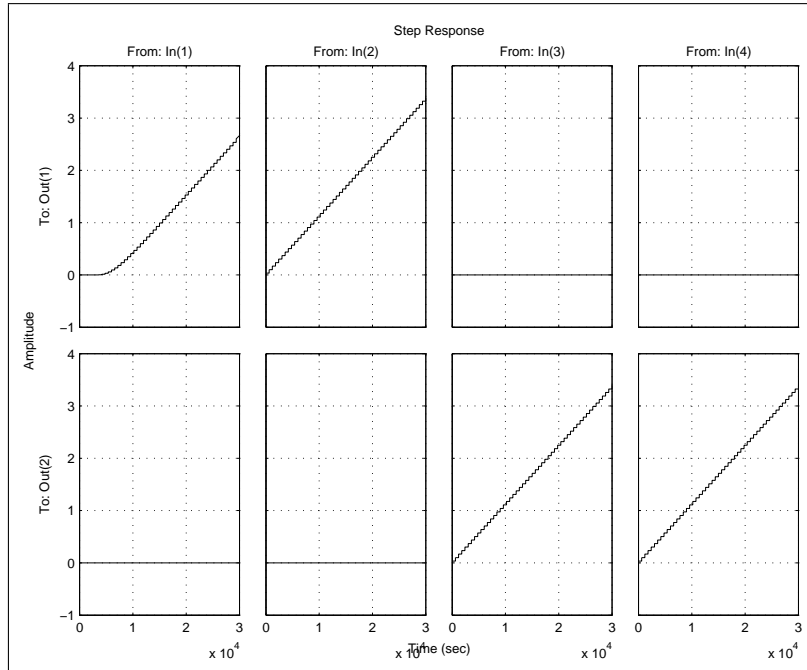


FIG. 3.8 – Réponse indicielle du transfert perturbations – variables contrôlées

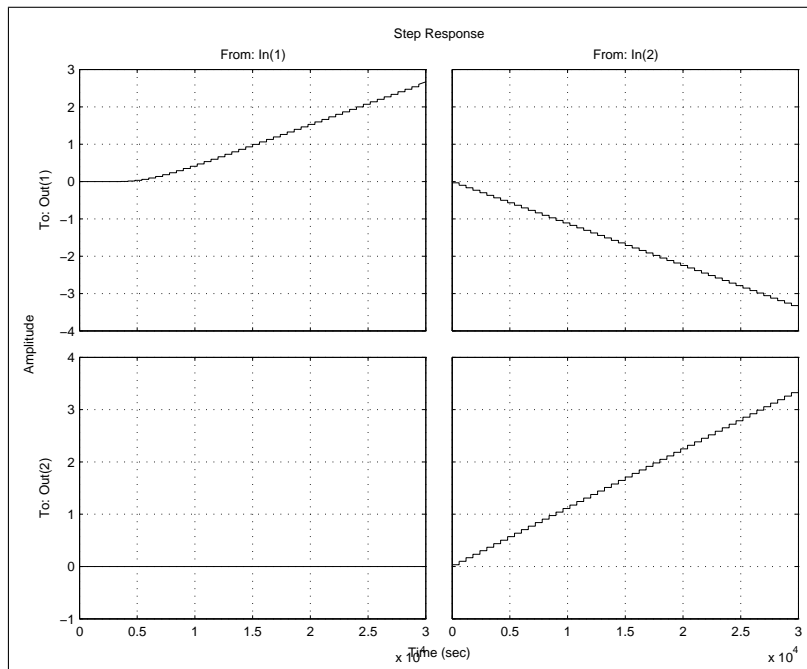


FIG. 3.9 – Réponse indicielle du transfert commandes – variables contrôlées

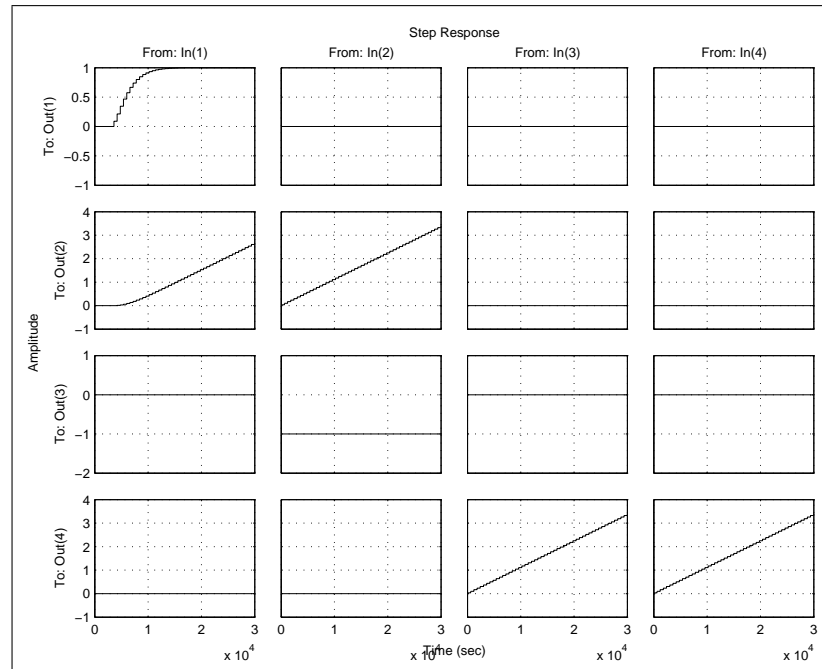


FIG. 3.10 – Réponse indicielle du transfert perturbations – variables mesurées

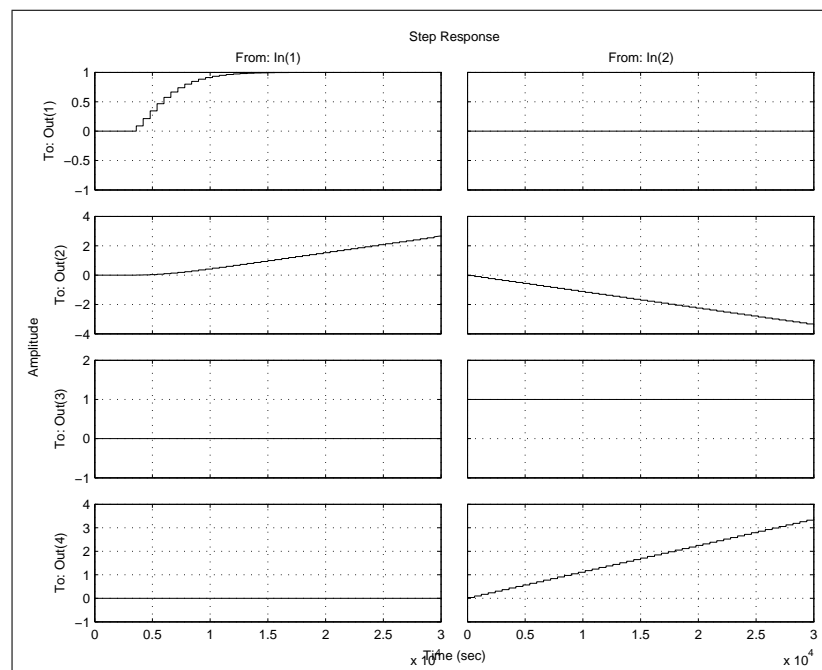


FIG. 3.11 – Réponse indicielle du transfert commandes – variables mesurées

Chapitre 4

La commande multivariable

Sommaire

4.1	Introduction	59
4.2	Les différents types de commandes existants	59
4.3	La commande optimale	61
4.3.1	Généralités	61
4.3.2	Calcul de la commande	61
4.3.3	Solution asymptotique	63
4.4	Observateur d'état	65
4.4.1	Principe	65
4.4.2	Convergence	66
4.4.3	Observation de prélèvements non mesurés	67
4.4.4	Convergence de l'observateur global	68
4.5	Conclusion	69

4.1 Introduction

Nous avons vu à la fin du chapitre précédent comment a été construit le modèle multivariable de la branche d'Aix Nord, dans le but de pouvoir synthétiser un contrôleur répondant aux spécifications du système. Nous verrons dans ce chapitre les différentes solutions qui s'offrent à nous, et nous expliquerons pourquoi notre choix s'est porté sur la commande optimale. Nous expliciterons ensuite de quelle manière est obtenue un contrôleur de ce type, et comment est construit l'observateur d'état servant à sa mise en œuvre.

4.2 Les différents types de commandes existants

Les canaux d'irrigation sont des systèmes caractérisés par des temps de retard élevés, des comportements fortement non-linéaires, des perturbations inconnues fortes

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

Malaterre [Mal94] et Sanfilippo [San97] proposent d'utiliser une commande optimale LQG pour la commande des canaux d'irrigation. Cependant, ce dernier mentionne la difficulté de calage des coefficients de pondération lors de la synthèse du contrôleur. Une telle méthode a récemment été testée sur un canal en Australie.

Des techniques de contrôle robuste ¹ 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 [Lit99] ou [MK00], et sont en cours de test sur le canal de Gignac.

On trouve aussi couramment des commandes prédictives, habituellement monovariées mais qui ont été appliquées aux systèmes de canaux (voir [SAAM90], [SFMM98] et [SFM01]). La CNR ² a développé un tel contrôleur sur les aménagements hydroélectriques du Rhône [PCS98], malheureusement sans le mettre en application.

Une des spécificités du système qui nous intéresse est la présence de variables discrètes — pompes — dans les commandes. On trouve dans la littérature des auteurs qui se sont penchés sur de tels problèmes, en étudiant des systèmes *Hybrid* [BBM98], *Mixed Logical Dynamical* [BM99], ou encore *Piecewise Linear* [BMDP02], [BBM02]. Toutes ces formulations conduisent à des systèmes linéaires d'inégalités, que l'on peut résoudre grâce à des algorithmes d'optimisation adaptés.

Citons aussi pour information la commande neuronale, la commande floue, qui a été mise en œuvre au Maroc et aux USA, ainsi que la commande non-linéaire qui reste pour l'instant au stade de la recherche.

On trouvera dans [MRS98] une classification des algorithmes de régulation les plus courants. [Mal03] donne un aperçu de tous les types de commande possibles, tandis que [GL02] énonce les grands principes des commandes les plus classiques.

À la SCP, lorsqu'une régulation doit être mise en place sur un réseau de transport à surface libre, l'étude est généralement menée par des hydrauliciens et non pas par des automaticiens. La commande multivariée 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. C'est pourquoi du fait de sa simplicité, notre choix s'est porté sur une commande optimale pour appréhender l'aspect multivariée du système.

1. 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.

2. Compagnie Nationale du Rhône

4.3 La commande optimale

4.3.1 Généralités

La minimisation d'un critère quadratique constitue l'un des moyens de parvenir à la détermination d'une commande pour des systèmes linéaires multi-dimensionnels. Pour de nombreux systèmes physiques, un critère quadratique permet d'exprimer de manière convenable les qualités globales recherchées pour la commande, qui correspondra au meilleur compromis entre les performances et la sollicitation des organes de réglage. En prenant l'exemple d'un système hydraulique, il pourra exprimer le désir de limiter les manœuvres sur les vannes tout en conservant les niveaux dans le canal ou les réserves à leurs valeurs de consigne. Mais bien que la méthode de minimisation d'un critère quadratique corresponde à une réalité physique, c'est aussi un outil mathématique dont le but est d'obtenir la commande souhaitée, et dont les divers coefficients de pondération sont autant de paramètres d'ajustement permettant d'obtenir les performances désirées pour la commande.

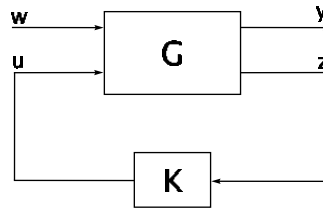


FIG. 4.1 – Boucle de commande

4.3.2 Calcul de la commande

Le système dynamique qui permet de calculer la commande est le suivant :

$$\begin{cases} X^+ = A_s X + B_s U \\ y = C_y X + D_y U \end{cases} \quad (4.1)$$

Le critère quadratique qui, via sa minimisation, permet de calculer les commandes $u(k)$, $k = 0$ à N s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} & \left[(X(k) - X_c(k))^T Q_X (X(k) - X_c(k)) \right. \\ & \left. + (u(k) - u_c(k))^T R (u(k) - u_c(k)) \right] \\ & + (X(N) - X_c(N))^T Q_{Xf} (X(N) - X_c(N)) \end{aligned} \quad (4.2)$$

où X_c et u_c sont les trajectoires de consigne sur X et u respectivement, et où Q_X , Q_{Xf} — Symétriques semi-définies positives — et R — symétrique définie positive —

sont les matrices de pondération sur les écarts. Le dernier terme du critère (4.2) porte sur l'état final que doit atteindre le système en fin de trajectoire. Dans notre cas nous ne considérerons pas de contraintes particulières sur la position finale au temps N , mais uniquement sur l'horizon 0 à $N - 1$. Le problème revient donc à déterminer la commande u minimisant J sous les contraintes liées à la dynamique du système (3.13).

Afin d'annuler les écarts de réglage en régime stationnaire entre les sorties contrôlées y et les consignes y_c , il est nécessaire d'ajouter un intégrateur [Büh83]. Il se construit en augmentant la dimension du vecteur d'état X en lui ajoutant les composantes X_I correspondant aux variables contrôlées dont on veut annuler les écarts. Le comportement dynamique de X_I est défini par :

$$\begin{cases} X_I^+ = X_I + B_I (y - y_c) \\ X_I(0) = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

avec : $B_I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, ce qui permet d'ajouter un intégrateur sur les deux sorties contrôlées. Sachant que $y = C_y X + D_y U$, on peut écrire :

$$X_I^+ = X_I + \begin{pmatrix} B_I C_y & B_I D_y & -B_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ U \\ y_c \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Le système dynamique dans l'espace d'état devient donc, en séparant les commandes u des perturbations w — qui peuvent être prévues ou mesurées — et des consignes y_c :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} X \\ X_I \end{pmatrix}^+ = \begin{pmatrix} A_s & 0 \\ B_I C_y & \mathbb{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ X_I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_u \\ B_I D_{yu} \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} B_w & 0 \\ B_I D_{yw} & -B_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ y_c \end{pmatrix} \\ y = \begin{pmatrix} C_y & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ X_I \end{pmatrix} + D_{yu} u + D_{yw} w \end{cases} \quad (4.5)$$

Dans la réalité, il est plus facile de définir une trajectoire de consigne sur les sorties y que sur les états X . En tenant compte également des états intégrés, on peut ré-écrire le critère J de la manière suivante :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[(y(k) - y_c(k))^T Q_y (y(k) - y_c(k)) \right. \\ \left. + (X_I(k) - X_{Ic}(k))^T Q_I (X_I(k) - X_{Ic}(k)) \right. \\ \left. + (u(k) - u_c(k))^T R_u (u(k) - u_c(k)) \right] \quad (4.6)$$

Les matrices de pondération deviennent alors :

$$Q_X = \begin{pmatrix} C_y^T Q_y C_y & 0 \\ 0 & Q_I \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$R = D_{yu}^T Q_y D_{yu} + R_u$$

Si le système est commandable ([Lar93] p. 125), alors une commande optimale u^* existe. Elle est obtenue par la résolution d'une équation de Riccati :

$$P = Q_X + A_s^T P^+ (\mathbb{I} - B_u L B_u^T P^+) A_s \quad (4.8)$$

avec : $L = [R + B_u^T P^+ B_u]^{-1}$ et s'écrit de la manière suivante :

$$u^* = -KX + H \quad (4.9)$$

C'est une commande par retour d'état avec un terme de gain K qui caractérise la commande en boucle fermée et un préfiltre H qui caractérise la commande en boucle ouverte ou par anticipation [GL02]. Le préfiltre tient compte des prévisions sur les perturbations et des différentes consignes. K et H varient en fonction du temps et sont données par :

$$K = L B_u^T P^+ A_s \quad (4.10a)$$

$$H = -L B_u^T P^+ e + L B_u^T v^+ + L R u_c \quad (4.10b)$$

où $e = \begin{pmatrix} B_w & 0 \\ B_I D_{yw} & -B_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ y_c \end{pmatrix}$ est le terme contenant les prévisions sur les perturbations et les consignes, et où v est obtenu par :

$$v = (A_s - B_u K)^T v^+ - (A_s - B_u K)^T P^+ e + Q_X X_c - K^T R u_c \quad (4.11)$$

4.3.3 Solution asymptotique

Dans la pratique, la matrice P et le vecteur v sont calculés par récurrence inverse en partant de $P(N) = 0$ et $v(N) = 0$, mais ces calculs sont assez lourds en terme de temps de calcul et de place mémoire. Cependant, il existe une solution sous-optimale de mise en œuvre plus aisée, qui peut être trouvée moyennant certaines simplifications. Lorsque l'horizon d'optimisation N tend vers l'infini, la solution $P(k)$ pour tout k fixé, de l'équation de Riccati tend vers une solution appelée solution asymptotique ou solution stationnaire. Cette solution, indépendante de k vérifie l'équation asymptotique de Riccati :

$$P = Q_X + (A_s - B_u K)^T P A_s \quad (4.12)$$

Le gain optimal K est alors constant. Le préfiltre H est lui variable dans le temps. Malaterre [Mal94] propose de faire l'hypothèse que les perturbations et les changements de consigne sont en forme d'échelon. Les variations de ces quantités sont alors prises en compte à l'instant $k = k_0$, en supposant la nouvelle valeur constante par la suite [Büh83]. Nous pouvons alors écrire (4.11) de la manière suivante :

$$[\mathbb{I} - (A_s - B_u K)^T] v = -(A_s - B_u K)^T P e + Q_X \begin{pmatrix} X_c \\ X_{I_c} \end{pmatrix} - K^T R u_c$$

soit :

$$v = -N(A_s - B_u K)^T P e + N Q_X \begin{pmatrix} X_c \\ X_{I_c} \end{pmatrix} - N K^T R u_c \quad (4.13)$$

avec : $N = [\mathbb{I} - (A_s - B_u K)^T]^{-1}$. La commande optimale (4.9) s'écrit alors :

$$u^* = -K X - M_e e + M_X \begin{pmatrix} X_c \\ X_{I_c} \end{pmatrix} + M_u u_c \quad (4.14)$$

avec :

$$K = L B_u^T P A_s \quad (4.15)$$

et :

$$\begin{cases} M_e = L B_u^T N P \\ M_X = L B_u^T N Q_X \\ M_u = L (\mathbb{I} - B_u^T N K^T) R \end{cases} \quad (4.16)$$

On peut décomposer M_e en deux parties, l'une portant sur les perturbations, l'autre sur les consignes : $M_e = \begin{pmatrix} M_{e_w} & M_{e_I} \end{pmatrix}$. De plus, comme il est plus facile de définir des consignes sur les sorties y que sur l'état X qui n'est *a priori* pas accessible de manière simple, on peut écrire : $y_c = C_y X_c + D_{y_u} u_c$. Comme on désire avoir une sollicitation minimum des actionneurs, on impose $u_c = 0$, et donc $y_c = C_y X_c$. Si C_y est de rang plein, les termes du préfiltre portant sur les perturbations et sur les consignes sur les états peuvent donc se ré-écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} M_e e &= \begin{pmatrix} M_{e_w} & M_{e_I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_w w \\ B_I D_{y_w} w - B_I y_c \end{pmatrix} \\ &= M_{e_w} B_w w + M_{e_I} (B_I D_{y_w} w - B_I y_c) \end{aligned} \quad (4.17)$$

et :

$$\begin{aligned} M_X \begin{pmatrix} X_c \\ X_{I_c} \end{pmatrix} &= L B_u^T N \begin{pmatrix} C_y^T Q_y C_y & 0 \\ 0 & Q_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ X_{I_c} \end{pmatrix} \\ &= L B_u^T N \begin{pmatrix} C_y^T Q_y \\ 0 \end{pmatrix} y_c + L B_u^T N \begin{pmatrix} 0 \\ Q_I \end{pmatrix} X_{I_c} \\ &= M_y y_c + M_{X_I} X_{I_c} \end{aligned} \quad (4.18)$$

avec :

$$\begin{cases} M_y = LB_u^T N \begin{pmatrix} C_y^T Q_y \\ 0 \end{pmatrix} \\ M_{X_I} = LB_u^T N \begin{pmatrix} 0 \\ Q_I \end{pmatrix} \end{cases} \quad (4.19)$$

Le but de l'intégrateur étant d'annuler les écarts par rapport à la consigne en régime permanent, la trajectoire sur les états intégrés n'a pas lieu d'être. On prend donc $X_{Ic} = 0$. La commande optimale devient alors :

$$u^* = -KX - (M_{e_I} B_I D_{yw} + M_{e_w} B_w) w + (M_y + M_{e_I} B_I) y_c \quad (4.20)$$

Nous utiliserons par la suite le gain optimal K calculé de manière asymptotique par l'équation (4.15). Pour le terme de boucle ouverte H , il sera possible d'utiliser soit le calcul asymptotique tel que décrit ci-dessus et qui donne la commande de l'équation (4.20), soit le calcul complet non asymptotique donné par l'équation (4.10b).

4.4 Observateur d'état

4.4.1 Principe

La commande optimale est une commande par retour d'état, c'est à dire que la boucle de rétroaction (*feedback*) de la commande, s'applique sur l'état du système à contrôler. Le vecteur d'état X du système est composé d'une combinaison linéaire de débits et de volumes en divers points du système, et il n'est pas toujours possible de le mesurer directement. Il est par contre possible de tenter de le reconstruire à partir des mesures z disponibles sur le terrain.

Notons \hat{X} le vecteur d'état reconstruit — ou observé. Il est inutile de reconstruire les composantes X_I de l'intégrateur, celles-ci pouvant être calculées à partir de l'état observé et des consignes y_c . Le système dynamique considéré pour le calcul de l'observateur s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} X^+ = A_s X + B_s U \\ z = C_z X + D_z U \end{cases} \quad (4.21)$$

On définit l'observateur d'état par :

$$\hat{X}^+ = A_s \hat{X} + B_s U + L(z - \hat{z}) \quad (4.22)$$

où L est un terme de gain. L'observateur est un modèle du système avec une entrée supplémentaire, proportionnelle à l'écart entre les mesures réelles z et les mesures reconstruites \hat{z} . Ces dernières sont calculées à partir de l'état observé par :

$$\hat{z} = C_z \hat{X} + D_z U \quad (4.23)$$

On obtient donc :

$$\boxed{\begin{cases} \hat{X}^+ = (A_s - LC_z) \hat{X} + \begin{pmatrix} B_s - LD_z & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ z \end{pmatrix} \\ \hat{z} = C_z \hat{X} + \begin{pmatrix} D_z & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ z \end{pmatrix} \end{cases}} \quad (4.24)$$

4.4.2 Convergence

Définissons $e_o = X - \hat{X}$ l'erreur de reconstruction de l'état du système. On a :

$$e_o^+ = X^+ - \hat{X}^+ = (A_s - LC_z) e_o \quad (4.25)$$

L'observateur est asymptotiquement stable si l'erreur d'observation tend vers 0 à l'infini. Cette condition est remplie si les valeurs propres de $(A_s - LC_z)$ ont un module strictement inférieur à 1. C'est donc la seule contrainte lors du choix des pôles de l'observateur, donc de la matrice L . Plus ils seront proches de 0, plus l'erreur d'observation sera annulée rapidement. Par contre, l'observateur risque d'être très sensible aux bruits de mesure. À l'inverse, des pôles proches de 1 rendront l'observateur plus lent. Le choix est donc fait dans un compromis entre la rapidité de l'observateur et la limitation de sa sensibilité aux bruits [Mal94]. La construction d'un observateur d'état peut se faire par une approche du type *filtre de Kalman* qui permet d'estimer l'état en minimisant la variance de l'erreur d'estimation [WB03]. Ce type d'estimation suppose que les bruits de mesure sont de type bruit blanc à moyenne nulle et à covariance connue, ou bien des bruits colorés de densité spectrale connue [Ous94].

Dans la réalité, il existe des écarts entre le modèle linéaire, qui a permis de synthétiser l'observateur, et le système réel. Ces écarts sont dus aux non-linéarités inhérentes à la réalité, et aux prélèvements inconnues qui interviennent sur le système. Si l'on note w_i les prélèvements inconnus et w_c les prélèvements connus, et que l'on sépare B_w en $\begin{pmatrix} B_{w_i} & B_{w_c} \end{pmatrix}$, on a :

$$X^+ = A_s X + \begin{pmatrix} B_u & B_{w_i} & B_{w_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w_i \\ w_c \end{pmatrix} \quad (4.26a)$$

$$\hat{X}^+ = A_s \hat{X} + \begin{pmatrix} B_u & B_{w_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w_c \end{pmatrix} + L(z - \hat{z}) \quad (4.26b)$$

L'erreur d'observation s'écrit alors :

$$e_o^+ = X^+ - \hat{X}^+ = (A_s - LC_z) e_o + (B_{w_i} - LD_{zw_i}) w_i \quad (4.27)$$

où D_{zw} est décomposée en $(D_{zw_i} \ D_{zw_c})$. Cette erreur ne tendant pas vers 0 à l'infini, il est donc impossible d'observer correctement le vecteur d'état à l'aide de l'observateur défini précédemment si les prélèvements ne sont pas connus. Il est par contre possible de reconstituer, en régime permanent, certaines perturbations non mesurées, à partir de l'erreur d'observation sur les sorties $z - \hat{z}$.

4.4.3 Observation de prélèvements non mesurés

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les prélèvements ou perturbations peuvent être décomposés en prélèvements connus w_c , et inconnus w_i . L'équation (4.26a) complétée de l'évolution des sorties donne le système dynamique suivant :

$$\begin{cases} X^+ = A_s X + \begin{pmatrix} B_u & B_{w_i} & B_{w_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w_i \\ w_c \end{pmatrix} \\ z = C_z X + \begin{pmatrix} D_u & D_{zw_i} & D_{zw_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w_i \\ w_c \end{pmatrix} \end{cases} \quad (4.28)$$

On définit l'observateur d'état par :

$$\begin{cases} \hat{X}^+ = A_s \hat{X} + \begin{pmatrix} B_u & B_{w_i} & B_{w_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \hat{w}_i \\ w_c \end{pmatrix} + L(z - \hat{z}) \\ \hat{z} = C_z \hat{X} + \begin{pmatrix} D_u & D_{zw_i} & D_{zw_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \hat{w}_i \\ w_c \end{pmatrix} \end{cases} \quad (4.29)$$

De la même manière, il est possible d'observer les prélèvements inconnus w_i en posant :

$$\hat{w}_i^+ = \hat{w}_i + L_i (z - \hat{z}) \quad (4.30)$$

L'expression de l'observateur que l'on appellera par la suite *observateur global*, puisqu'il contient à la fois l'état et les prélèvements — par opposition à l'observateur simple qui ne contient que l'état — s'écrit finalement en augmentant l'état \hat{X} à l'aide

des perturbations estimées \hat{w}_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} \hat{X} \\ \hat{w}_i \end{array} \right)^+ = \begin{pmatrix} A_s - LC_z & B_{w_i} - LD_{zw_i} \\ -L_i C_z & \mathbb{I} - L_i D_{zw_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X} \\ \hat{w}_i \end{pmatrix} \\ \quad + \begin{pmatrix} B_u - LD_{zu} & B_{w_c} - LD_{zw_c} & L \\ -L_i D_{zu} & -L_i D_{zw_c} & L_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w_c \\ z \end{pmatrix} \\ \hat{z} = \begin{pmatrix} C_z & D_{zw_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X} \\ \hat{w}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_{zu} & D_{zw_c} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w_c \\ z \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (4.31)$$

4.4.4 Convergence de l'observateur global

Soit e_o l'erreur d'estimation. On a :

$$e_o^+ = X^+ - \hat{X}^+ = (A_s - LC_z) e_o + (B_{w_i} - LD_{zw_i}) (w_i - \hat{w}_i) \quad (4.32)$$

L'équation (4.30) peut s'écrire aussi :

$$\hat{w}_i^+ = \hat{w}_i + L_i C_z e_o + L_i D_{zw_i} (w_i - \hat{w}_i) \quad (4.33)$$

Le système d'équations composé de (4.32) et (4.33) s'écrit :

$$\begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix}^+ = \underbrace{\begin{pmatrix} A_s - LC_z & -B_{w_i} + LD_{zw_i} \\ L_i C_z & \mathbb{I} - L_i D_{zw_i} \end{pmatrix}}_{A_e} \begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} B_{w_i} - LD_{zw_i} \\ L_i D_{zw_i} \end{pmatrix}}_{B_e} w_i \quad (4.34)$$

Si les valeurs propres de A_e sont de module inférieur à 1 et si w_i est constant à l'infini, alors la suite définie par le système (4.34) converge et sa limite à l'infini est :

$$\begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix}^\infty = A_e \begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix}^\infty + B_e w_i^\infty \quad (4.35a)$$

$$\begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix}^\infty = (\mathbb{I} - A_e)^{-1} B_e w_i^\infty \quad (4.35b)$$

Posons :

$$(\mathbb{I} - A_e)^{-1} = E = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

L'équation (4.35b) s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix}^\infty = \begin{pmatrix} E_{11}(B_{w_i} - LD_{zw_i}) + E_{12}L_iD_{zw_i} \\ E_{21}(B_{w_i} - LD_{zw_i}) + E_{22}L_iD_{zw_i} \end{pmatrix} w_i^\infty \quad (4.37)$$

L'équation (4.36) peut s'écrire aussi :

$$\mathbb{I} = E(\mathbb{I} - A_e) = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbb{I} - A_sLC_z & B_{w_i} - LD_{zw_i} \\ -L_iC_z & L_iD_{zw_i} \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

et donner le système d'équations suivant :

$$1 = E_{11}(\mathbb{I} - A_sLC_z) - E_{12}L_iC_z \quad (4.39a)$$

$$0 = E_{21}(\mathbb{I} - A_sLC_z) - E_{22}L_iC_z \quad (4.39b)$$

$$0 = E_{11}(B_{w_i} - LD_{zw_i}) + E_{12}L_iD_{zw_i} \quad (4.39c)$$

$$1 = E_{21}(B_{w_i} - LD_{zw_i}) + E_{22}L_iD_{zw_i} \quad (4.39d)$$

En remplaçant les équations (4.39c) et (4.39d) dans (4.37) on trouve :

$$\begin{pmatrix} e_o \\ \hat{w}_i \end{pmatrix}^\infty = \begin{pmatrix} 0 \\ w_i^\infty \end{pmatrix} \quad (4.40)$$

Nous avons donc montré que l'erreur d'observation e_o tends bien vers 0 à l'infini, et que l'estimation des prélèvements inconnus \hat{w}_i converge vers la valeur réelle des prélèvements w_i . Le calage de l'observateur global consiste donc à choisir les matrices L et L_i de manière à ce que les valeurs propres de la matrice A_e soient de module inférieur à 1. Pour cela, on peut écrire A_e de la manière suivante :

$$A_e = \begin{pmatrix} A_s & B_{w_i} \\ 0 & \mathbb{I} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L \\ L_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_z & D_{zw_i} \end{pmatrix} = \mathcal{A} - \mathcal{LC} \quad (4.41)$$

En pratique, les matrices L et L_i peuvent être construites par une méthode de placement de pôles, ou via la minimisation de l'erreur de reconstruction — filtre de Kalman [Mal98]. C'est cette dernière approche que nous utiliserons par la suite.

4.5 Conclusion

Nous avons construit dans ce chapitre un contrôleur et un observateur adaptés aux besoins du système hydraulique de la branche d'Aix Nord.

Le contrôleur a été synthétisé dans deux versions. L'une dite asymptotique, plus simple et ne demandant pas de calculs lors d'un cycle de régulation. L'autre plus complexe, comportant une partie pré-filtre non asymptotique, demandant de générer

une partie des termes du contrôleur en cours de régulation, mais plus performante dans sa partie anticipation des prélèvements.

L'observateur d'état a lui été généré dans une version simplifiée à laquelle il faut fournir les informations sur les prélèvements, et une version complète — ou globale — capable de reconstruire les prélèvements inconnus survenant sur le système. L'observateur étant construit à partir d'un modèle linéaire du système, il ne prend donc pas en compte les non-linéarités. Appliqué sur un système réel — ou un modèle non-linéaire — on peut donc s'attendre à voir apparaître une erreur d'observation $e_o = X - \hat{X}$ non nulle. Cette erreur est gênante, d'autant que l'état intégré X_I est construit à partir de l'état observé \hat{X} . Si ce dernier est éloigné de l'état réel, cela conduirait alors à un écart de réglage en régime permanent. Une manière de contourner le problème est de calculer l'état intégré directement à partir des sorties contrôlées y et des consignes y_c correspondantes. Cela n'est possible que si ces sorties contrôlées sont aussi des variables mesurées z [Mal94].

Chapitre 5

Application à la branche d'Aix Nord

Sommaire

5.1	Introduction	72
5.2	Calage du contrôleur	72
5.2.1	Méthodologie	72
5.2.2	Règle de Bryson	72
5.3	Calage de l'observateur	73
5.4	Robustesse	74
5.5	Traitement des cas particuliers	76
5.5.1	Généralités	76
5.5.2	Calcul du débit à régler	76
5.5.3	Report vers les perturbations	77
5.5.4	Évaluation	77
5.6	Définition des scénarios	78
5.7	Modèle linéaire	78
5.7.1	Généralités	78
5.7.2	Observateur simple	79
5.7.3	Observateur global	79
5.8	Modèle non-linéaire	85
5.8.1	Généralités	85
5.8.2	Préfiltre asymptotique	85
5.8.3	Préfiltre non asymptotique	93
5.9	Comparaison avec des mesures de terrain	102
5.9.1	Généralités	102
5.9.2	Simulation et commentaires	102
5.10	Conclusions	105

5.1 Introduction

Nous avons vu, aux chapitres précédents, comment modéliser la branche d'Aix Nord du canal de Provence, dans un formalisme adapté à la commande automatique. La manière de construire un contrôleur multivariable a aussi été abordée, dans le but de l'appliquer sur ce système. Nous aborderons dans ce chapitre les essais effectués sur modèles linéaire et non-linéaire de la branche, intégrant les différentes variantes du contrôleur et de l'observateur que nous avons introduites auparavant. Contrôleur avec préfiltre asymptotique ou non asymptotique, avec ou sans prévision, observateur d'état ou d'état et de perturbations, seront tour à tour testés et comparés.

Dans un premier temps, nous essayerons de définir une base pour le calage des coefficients du contrôleur. La robustesse du contrôleur ainsi obtenu sera ensuite abordée avant de nous intéresser aux simulations proprement dites. Des cas de poursuite de consigne et de rejet de perturbation seront testés, avant de comparer le contrôleur multivariable au contrôleur en place par test d'un scénario réel.

5.2 Calage du contrôleur

5.2.1 Méthodologie

Les paramètres de calage du contrôleur sont les coefficients de pondération du critère quadratique. Ils expriment l'influence de chacune des variables à laquelle ils sont associés sur la position du minimum du critère J défini par (4.2). Ainsi, il sera possible d'orienter la réaction du contrôleur afin d'augmenter ou de diminuer la variation d'une variable par rapport à une autre. En augmentant l'un des coefficients de R_u — respectivement Q_y — il est clair que l'on pénalisera plus fortement la commande u correspondante — respectivement la sortie y correspondante — ce qui se traduit par des écarts transitoires de moindre amplitude, un retour plus rapide vers la consigne, et une tendance à l'effet inverse sur les autres grandeurs. De manière générale, on peut prévoir que si l'on augmente globalement Q_y par rapport à R_u , on obtiendra globalement des réponses plus rapides au prix de commandes plus énergiques.

Des règles empiriques existent pour une évaluation initiale de ces coefficients. Nous avons utilisé ici la règle de Bryson.

5.2.2 Règle de Bryson

Le but est ici de calculer une première valeur des matrices de pondération Q_y et R_u à l'aide de la règle de Bryson ([Lar93] p. 213).

En posant $R_u = \text{diag}(r_{u_1} \ r_{u_2} \ \dots \ r_{u_i})$ et $Q_y = \text{diag}(q_{y_1} \ q_{y_2} \ \dots \ q_{y_i})$, on peut se baser, pour le choix des coefficients, sur le calibrage physique des entrées –

sorties correspondantes, et poser :

$$r_{u_i} = \left(\frac{1}{\sup u_i} \right)^2 \quad (5.1a)$$

$$q_{y_i} = \left(\frac{1}{\sup y_i} \right)^2 \quad (5.1b)$$

On pourra ensuite affiner le choix des pondérations par essais et erreurs en simulation. L'application de la règle donne pour valeur de départ, en considérant des variations de débit de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ sur u_1 et de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ sur u_2 , et des variations de volume du dixième de la capacité de la réserve considéré sur y_1 et y_2 :

TAB. 5.1 – *Pondérations initiales du contrôleur*

R_u	Q_y
$\begin{pmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 22 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 25 \end{pmatrix}$

Dans la pratique, nous avons souhaité brider un peu les variations de volume afin d'éviter les débordements des réserves. De plus, la commande u_1 s'est avérée trop lente, nous avons donc augmenté le poids correspondant sur y pour avoir une réponse plus rapide.

Il est de plus nécessaire de caler la pondération sur l'intégrateur Q_I . Une valeur trop grande entraîne rapidement des instabilités, tandis qu'une valeur trop faible augmente les temps de retour à la consigne.

En cherchant à nous rapprocher de mesures de terrains, nous avons opté pour le jeu de pondérations suivant :

TAB. 5.2 – *Pondérations du contrôleur*

R_u	Q_y	Q_I
$\begin{pmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 20 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 50 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

5.3 Calage de l'observateur

Le calage de l'observateur simple et de l'observateur global est fait par une approche du type filtre de Kalman [WB03]. Cette méthode permet d'estimer l'état du système par minimisation de la covariance de l'erreur de reconstruction. En l'absence d'informations sur les bruits pouvant influencer la mesure et le procédé, des essais sont réalisés afin de caler les matrices de covariance des différentes erreurs. Les

pondérations suivantes donnent des résultats acceptables avec le module des pôles régulièrement réparti entre 0 et 1. G est le gain sur les bruit de procédé, Q est la covariance de ces bruits, et R la covariance des bruits de mesure.

TAB. 5.3 – Pondérations des observateurs

G	Q	R
$\begin{pmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 100 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$

5.4 Robustesse

La synthèse du contrôleur est effectuée sur un modèle du système. Or, il existe toujours une différence entre ce modèle et la réalité, due à des incertitudes sur les paramètres de calage, des erreurs de mesure, des approximations faites lors du choix de la forme du modèle, ou venant tout simplement de la linéarisation autour d'un point de fonctionnement. Ces incertitudes entre la dynamique réelle \tilde{G} et la dynamique telle qu'elle a été modélisée G sont notées $\Omega_p \Delta$, $\|\Delta\|_\infty \leq 1$. Elle peuvent être additives : $\tilde{G} = G + \Omega_p \Delta$, multiplicatives : $\tilde{G} = G(1 + \Omega_p \Delta)$, ou inverse multiplicatives : $\tilde{G} = G(1 + \omega_p \Delta)^{-1}$.

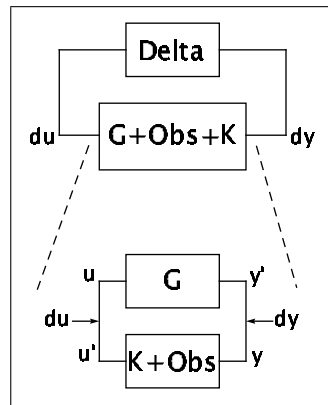


FIG. 5.1 – Points d'entrée des perturbations

On peut définir chacun de ces transferts entre deux points — entrée et sortie, montrées sur le tableau 5.4 — de la boucle fermée. La fonction associée est appelée fonction de sensibilité¹ et caractérise la robustesse du contrôleur. L'inverse de la

1. Le terme de *fonction de sensibilité* est normalement réservé aux transferts S_o et S_i . Nous l'utiliserons ici, par abus de langage, de manière générique pour les six transferts.

norme de cette fonction correspond à la perturbation Δ maximale admissible par la boucle fermée. Plus la norme cette fonction de sensibilité sera faible, plus la boucle fermée sera robuste vis-à-vis d'une perturbation.

Nous aurions pu choisir d'effectuer la synthèse du contrôleur de manière à respecter certaines marges de robustesse, mais nous nous sommes penchés vers une approche LQG plus simple, où nous pouvons vérifier les marges *a posteriori*. Le tableau 5.4 donne les fonctions de sensibilité pour le système constitué du contrôleur, de l'intégrateur et de l'observateur global.

TAB. 5.4 – *Fonctions de sensibilité*

Fonction de sensibilité	Entrée	Sortie	Norme			
			H_∞	H_2	l_1	μ
S_o	dy	y	8,0	9,0	33	8,0
T_o	dy	y'	7,9	8,5	32	7,9
S_i	du	u	2,7	1,7	4,3	2,7
T_i	du	u'	2,0	0,9	3,3	2,9
S_iK	dy	u	6,9	7,4	32	6,3
S_oG	du	y	3,2	2,1	4,3	3,2

Certaines de ces valeurs sont relativement élevées. On peut penser que des problèmes d'instabilité pourront survenir assez rapidement sur le système. Mais les amplitudes maximum des perturbations calculées ici peuvent très bien correspondre à un type de perturbation qui ne serait pas physique pour le système étudié, et qui n'a donc aucune chance d'apparaître.

TAB. 5.5 – *Norme H_∞ des fonctions de sensibilité en fonction du débit*

Fonction de sensibilité	Débit [l/s]	
	200	1200
S_o	14,2	11,7
T_o	14,0	11,6
S_i	2,7	3,5
T_i	3,0	3,1
S_iK	13,1	9,3
S_oG	4,9	4,5

Nous pouvons étudier l'évolution de la robustesse du contrôleur en fonction du point de fonctionnement. Le tableau 5.5 donne l'évolution de la robustesse de

l'ensemble contrôleur, intégrateur et observateur calculé pour un fonctionnement à 700 l/s lorsqu'il est appliqué à un système avec un débit en tête de 200 l/s et de 1200 l/s. On constate une augmentation de la norme H_∞ sans qu'elle atteigne toutefois des valeurs trop importantes.

Ces valeurs semblent confirmer la robustesse de l'ensemble, cependant seuls des tests sur un modèle non-linéaire ou une évaluation explicite des incertitudes Δ pourront confirmer la stabilité du contrôleur à tous les points de fonctionnement. Une étude fréquentielle des fonctions de sensibilité permettrait également d'avoir une idée plus claire du comportement du système. Cette approche n'a pas été réalisée ici.

5.5 Traitement des cas particuliers

5.5.1 Généralités

La deuxième commande du système étudié est le débit à la station de pompage de la Barounette. Cette station comporte quatre pompes en parallèle fonctionnant en tout ou rien. La commande continue calculée par le contrôleur n'y est donc pas applicable directement. On dispose quand même de la connaissance du débit à la sortie de la station en fonction du nombre de pompes en route. Il y a donc un choix à faire sur la commande que l'on va envoyer à la station de pompage, et sur l'utilisation de la perturbation induite par la différence entre le débit calculé et le débit réglé. Notons que [OSB03] est confronté au même problème lors de l'implémentation d'une commande prédictive sur un système servant à la fois à l'irrigation et au drainage des polders aux Pays Bas, mais il n'est fait aucune mention des solutions adoptées. D'autre part, une approche du type *système hybride* comme cité au chapitre 4.2 aurait pu être utilisée. Par soucis de simplicité, nous avons choisi de rester dans le cadre d'une commande optimale classique.

TAB. 5.6 – Débits de la station de pompage de la Barounette

Nb pompe	1	2	3	4
Débit [m ³ /s]	0,21	0,35	0,44	0,50

5.5.2 Calcul du débit à régler

Plusieurs choix sont possibles pour déterminer le débit à régler à la station de pompage :

sélection du débit inférieur au débit calculé ;

sélection du débit le plus proche au débit calculé ;

sélection du débit par paliers, où le débit calculé doit être supérieur de 20 % au débit correspondant à la mise en route d'une pompe supplémentaire pour

donner l'ordre de mise en marche, et inférieur de 20 % du débit réglé actuel pour arrêter une pompe ;

sélection du débit par paliers décentrés, dont le mode de fonctionnement est identique au précédent, sauf que les seuils se situent à +30 % du débit à régler à la montée, et -10 % du débit réglé à la descente.

5.5.3 Report vers les perturbations

La différence entre le débit calculé et le débit réglé peut être utilisée afin d'améliorer les performances. En effet, il existe une prise en amont de la station de pompage — w_2 — et une prise en aval — w_3 . Il est donc possible de reporter la différence de débit — ou une fraction de cette différence — en l'ajoutant ou en la retranchant sur ces deux perturbations.

On définit donc le coefficient de report C_r indiquant comment est reportée sur w_i la différence entre le débit calculé u_{2c} et le débit réglé u_{2r} :

$$\begin{aligned} w_2 &= w_2 - C_r(u_{2c} - u_{2r}) \\ w_3 &= w_3 + C_r(u_{2c} - u_{2r}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Il est en outre possible de répartir cette valeur sur n pas de temps afin de ne pas avoir des variations trop brutales sur les perturbations.

5.5.4 Évaluation

Nous avons ici un bon nombre de combinaisons différentes pour la gestion de la station de pompage. Deux critères ont été choisis pour juger les performances des différentes options de calcul. Sur un scénario de rejet de perturbation où le prélèvement n'est pas égal à l'une des valeurs de débit que peut fournir la station, il est très peu probable que le débit délivré pendant un pas de temps par les pompes soit exactement celui nécessaire à retourner à la consigne sur les réserves. On observe donc au bout d'un temps suffisamment long une oscillation du volume dans les réserves, et a une mise en route périodique d'une pompe supplémentaire à la station. Le premier critère consiste donc à calculer l'écart-type autour du volume de consigne en régime établi oscillatoire. Le second critère est le nombre de mise en route de pompes sur un intervalle de temps donné, toujours en régime établi oscillatoire. Les résultats complets se trouvent dans l'annexe A. Nous nous contenterons dans ce chapitre de citer les conclusions :

- le choix du débit inférieur donne un écart-type plus faible sur les volumes des réserves et logiquement un nombre de mise en route plus important ;
- le fait de choisir le débit le plus proche donne un nombre de mise en route plus faible ;
- l'écart-type le plus faible sur les volumes est souvent donné par l'ajout de la différence entre le débit calculé et le débit à régler sur w_2 et le retrait de cette différence sur w_3 ($C_r = -1$) ;

- le nombre de mise en route le plus faible est souvent donné par l'ajout du double de la différence sur w_3 et le retrait sur w_2 ($C_r = 2$);
- le fait de reporter une fraction de la différence de débits sur plusieurs pas de temps diminue le nombre de mise en marche de pompe mais augmente l'écart-type des volumes.

L'exploitation et la maintenance d'un ouvrage tel que le canal de Provence impose des contraintes sur l'utilisation du matériel électro-mécanique présent dans les différentes stations. Il est donc nécessaire de ne pas trop solliciter les pompes par des mises en route et des arrêts trop fréquents. Nous prendrons donc les caractéristiques suivantes pour la détermination du débit à appliquer à la station de pompage privilégiant une moindre sollicitation des pompes, sans toutefois pénaliser trop fortement les variations de volume :

- le débit le plus proche au débit calculé sera utilisé ;
- la différence entre le débit calculé et le débit appliqué sera retranchée à w_2 et ajoutée à w_3 ($C_r = 1$) ;
- cette différence sera appliquée toute entière au pas de temps suivant.

5.6 Définition des scénarios

Dans la suite, nous ne présenterons pas de manière exhaustive toutes les combinaisons que l'on peut envisager avec toutes les options différentes sur le type de modèle, l'observateur ou le contrôleur. Nous nous bornerons à montrer les cas les plus significatifs sur les scénarios suivants :

Rejet de perturbation : augmentation des prélèvements de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ à $4^{\text{h}}00$ sur w_2 , et de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ à $5^{\text{h}}00$ sur w_3 .

Poursuite de consignes : augmentation du volume de consigne de $1\,255 \text{ m}^3$ à $4^{\text{h}}00$ sur y_1 , et diminution de 684 m^3 à $5^{\text{h}}00$ sur y_2 .

5.7 Modèle linéaire

5.7.1 Généralités

Les simulations sont menées ici sur un modèle du système, linéarisé autour d'un point de fonctionnement donné — débit amont de 700 l/s . Nous testerons l'observateur d'état simple, et l'observateur global, d'état et de prélèvements. Le scénario de rejet de perturbations avec l'observateur simple sera présenté dans le cas où la prévision existe, et dans le cas où elle n'existe pas. Le scénario de poursuite de consignes ne présentant pas de différences visibles entre les deux versions de l'observateur, nous ne présenterons les résultats que pour l'observateur global.

5.7.2 Observateur simple

Rejet de perturbations avec prévisions Les figures 5.2 et 5.3 présentent respectivement les commandes et les sorties du scénario de régulation. On note une réponse rapide du contrôleur, et un retour à la consigne effectif au bout d'une dizaine d'heures. L'information sur les prélèvements étant cependant connue — prévisions — cela facilite la tâche du contrôleur.

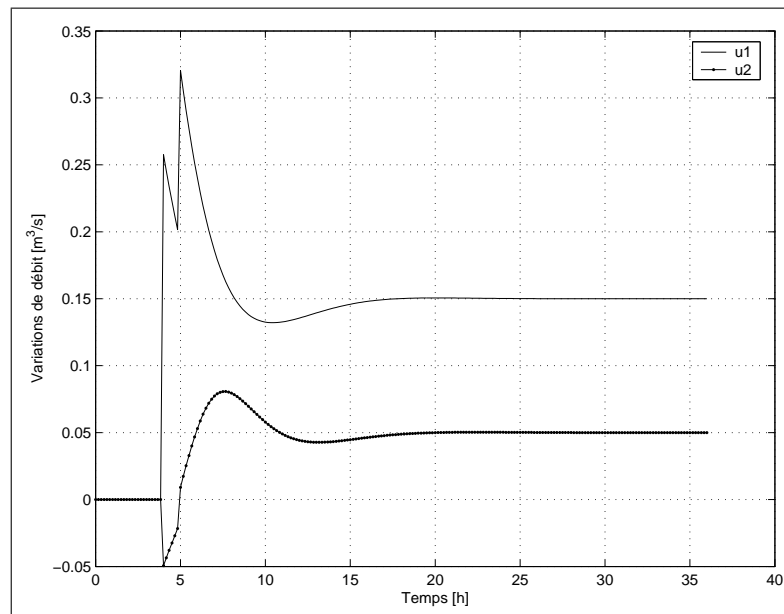


FIG. 5.2 – *Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des commandes*

Rejet de perturbations sans prévision Dans ce cas, il n'y a aucune prévision sur les prélèvements. Les commandes et les sorties sont données sur les figures 5.4 et 5.5. La réponse du contrôleur est moins rapide, et l'amplitude de variation des sorties plus importante. La figure 5.6 présente la différence entre le vecteur d'état réel et le vecteur d'état observé. En régime stationnaire, il reste un écart entre ces deux grandeurs, du à la méconnaissance des perturbations. Le retour à la consigne est cependant assuré par la partie intégratrice du contrôleur.

5.7.3 Observateur global

Rejet de perturbations Une alternative au manque de prévisions est d'observer les perturbations intervenant sur le système. L'observateur global permet de le faire. Les figures 5.7, 5.8 et 5.9 présentent l'évolution des commandes, des sorties et des perturbations réelles et observées. On retrouve ici un comportement très proche de

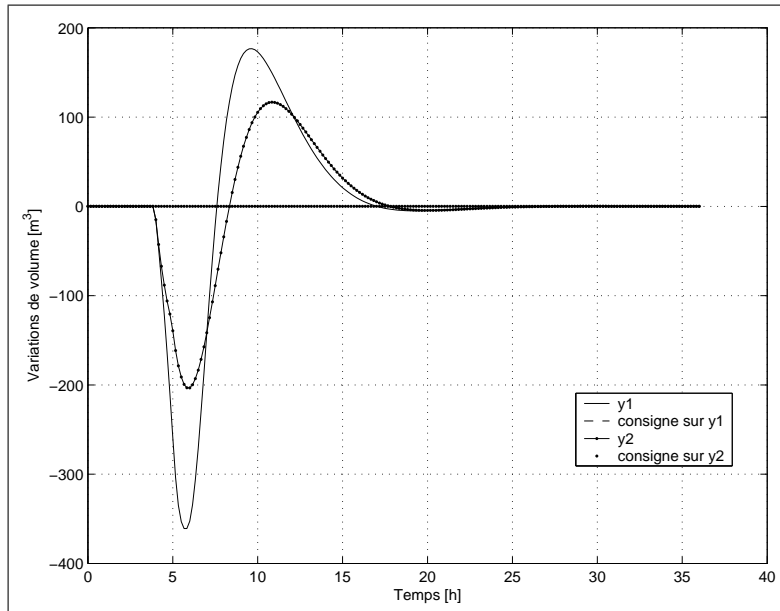


FIG. 5.3 – *Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des sorties*

celui du cas de régulation avec observateur simple et prévisions. La figure 5.9 montre que les perturbations sont bien observées. La reconstruction de w_2 est immédiate, ce prélèvement étant situé entre deux points du système où le débit est connu. Pour w_3 , la convergence est un peu plus lente — une dizaine de pas de temps.

Poursuite de consignes Les commandes et les sorties sont données sur les figures 5.10 et 5.11. La réponse est rapide, et la nouvelle consigne est atteinte une dizaine d'heures après l'échelon.

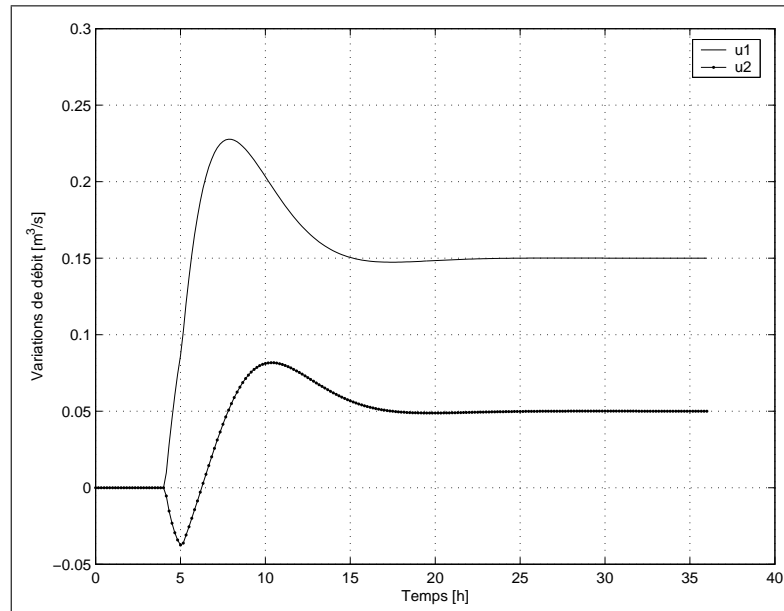


FIG. 5.4 – *Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des commandes*

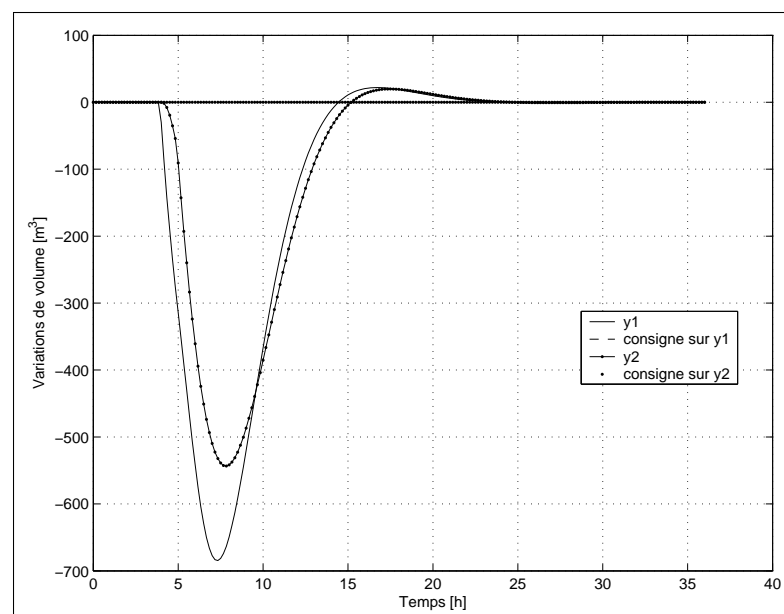


FIG. 5.5 – *Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des sorties*

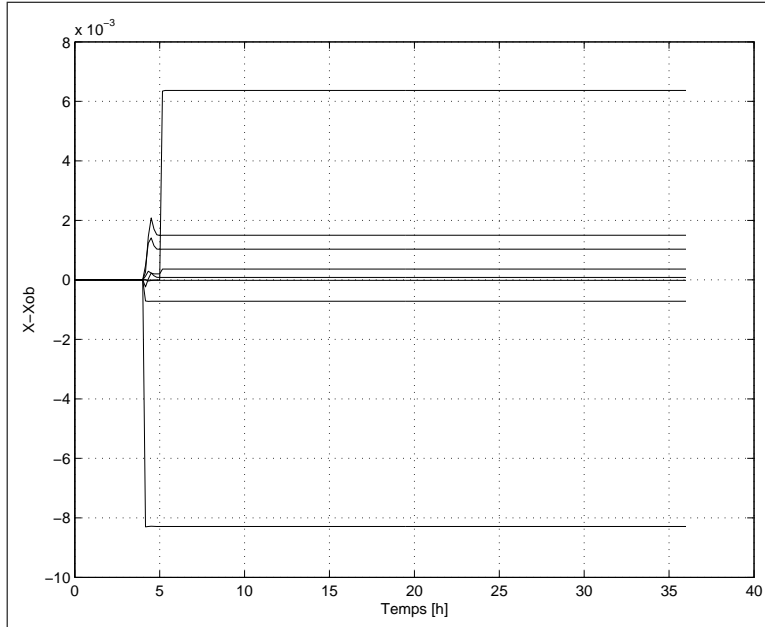


FIG. 5.6 – *Modèle linéaire – Observateur simple – Rejet de perturbations sans prévision – Différence entre l'état et l'état observé*

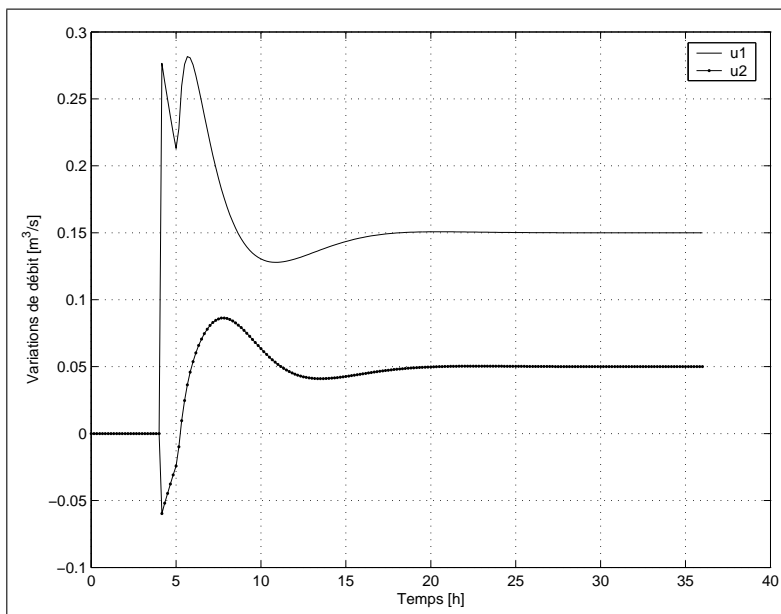


FIG. 5.7 – *Modèle linéaire – Observateur global – Rejet de perturbations – Évolution des commandes*

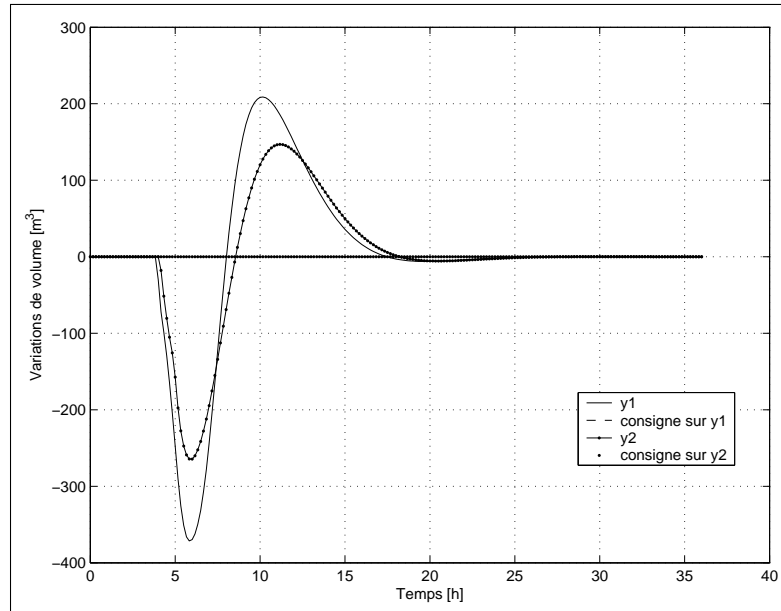


FIG. 5.8 – *Modèle linéaire – Observateur global – Rejet de perturbations – Évolution des sorties*

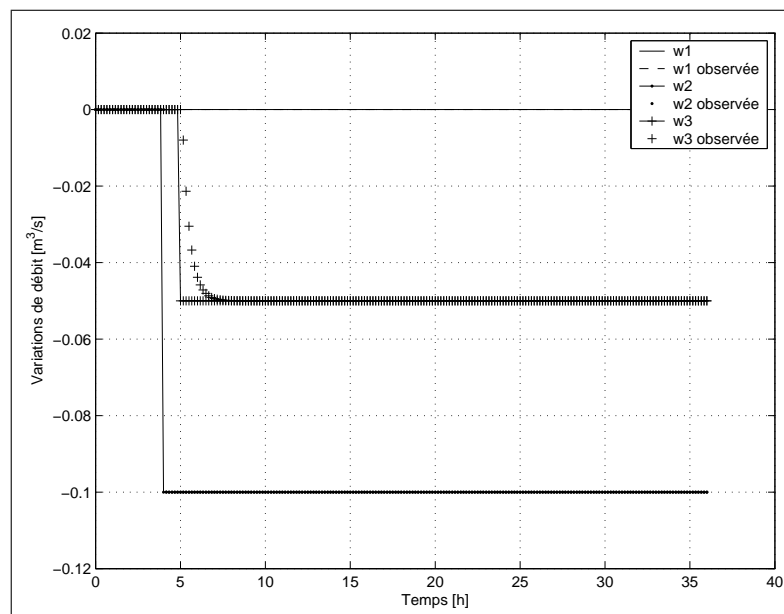


FIG. 5.9 – *Modèle linéaire – Observateur global – Rejet de perturbations – Évolution des perturbations*

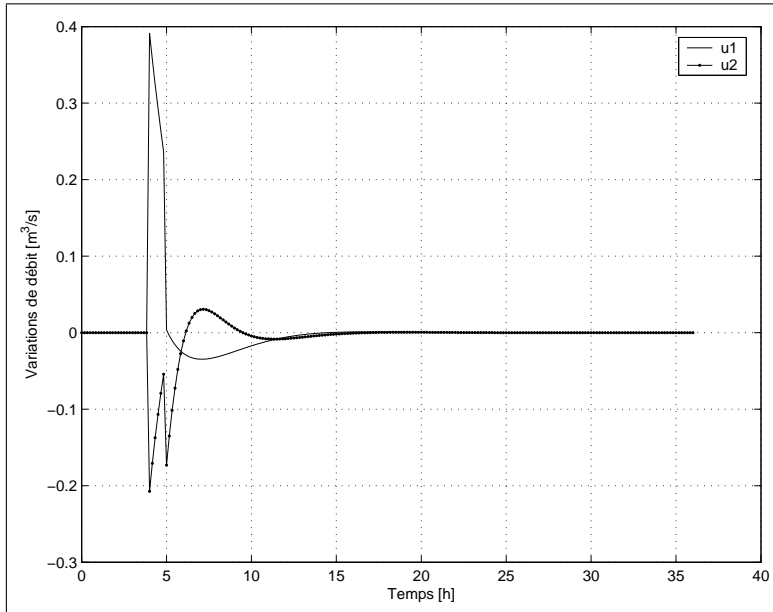


FIG. 5.10 – *Modèle linéaire – Observateur global – Poursuite de consignes – Évolution des commandes*

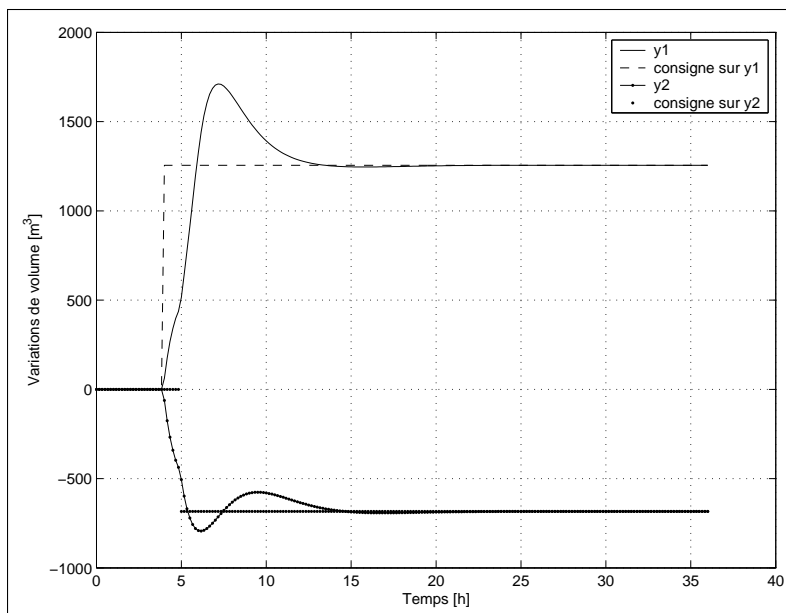


FIG. 5.11 – *Modèle linéaire – Observateur global – Poursuite de consignes – Évolution des sorties*

5.8 Modèle non-linéaire

5.8.1 Généralités

Les simulations sont menées ici sur le logiciel SIC du CEMAGREF. Dans cette partie, nous n'utiliserons que l'observateur global, d'état et de perturbations. Nous testerons cependant le contrôleur dans sa version avec préfiltre asymptotique et non asymptotique, ainsi que la commande discrète et continue de la station de pompage de la Barounette. Dans le cas du préfiltre non asymptotique, l'horizon de prévision sera fixé à 4 heures, et nous étudierons deux cas de rejet de perturbations, l'un sans prévision et l'autre avec prévisions.

5.8.2 Préfiltre asymptotique

Commande continue

Rejet de perturbations Nous présentons ici respectivement sur les figures 5.12, 5.13 et 5.14, l'évolution des commandes u , des sorties y et des perturbations réelles et observées w . La réaction du contrôleur est très rapide et le retour au volume de consigne est effectif une dizaine d'heures après l'apparition de la première perturbation. Sur l'observation des perturbations, on peut noter une très bonne reconstruction de w_2 — prélèvement situé entre deux mesures de débit — et une convergence rapide de w_3 vers sa valeur stationnaire. La reconstruction de w_1 effectue quelques oscillations malgré l'absence de perturbations. Par rapport au modèle linéaire, on remarque tout de même des oscillations de la commande, et une plus grande amplitude sur les variations de u et de y .

Poursuite de consignes Les commandes, sorties et perturbations reconstruites sont données sur les figures 5.15, 5.16 et 5.17. La réaction du contrôleur est ici aussi très rapide, et la consigne est atteinte en 5 heures. L'observateur de perturbations reconstruit des prélèvements inexistant, mais qui convergent tout de même rapidement vers une valeur nulle.

Commande discrète

Rejet de perturbations Les figures correspondantes sont données en 5.18, 5.19 et 5.20. Le temps de retour à la consigne est ici du même ordre que dans le cas d'une commande continue, avec cependant des amplitudes dans les variations plus importantes. Le régime stationnaire n'est jamais atteint car les échelons de débit de la station de pompage n'ont pas la valeur exacte requise pour retrouver la consigne de volume. Le système s'installe alors dans un régime établi oscillatoire.

Poursuite de consignes Les commandes, sorties et perturbations correspondant à ce cas sont données sur les figures 5.21, 5.22 et 5.23. Cet essai est particulier car

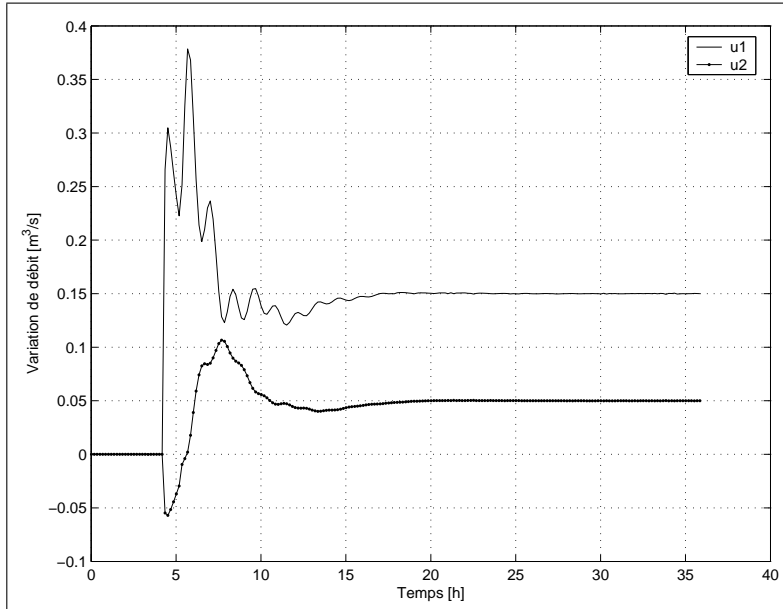


FIG. 5.12 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations – Évolution des commandes*

les volumes mis en jeu pour atteindre les nouvelles consignes correspondent à ce que peut fournir la station de pompage sur un nombre de pas de temps fini. On évite ainsi le régime oscillatoire établi. Notons que le temps de retour à la consigne est plus faible que dans le cas continu.

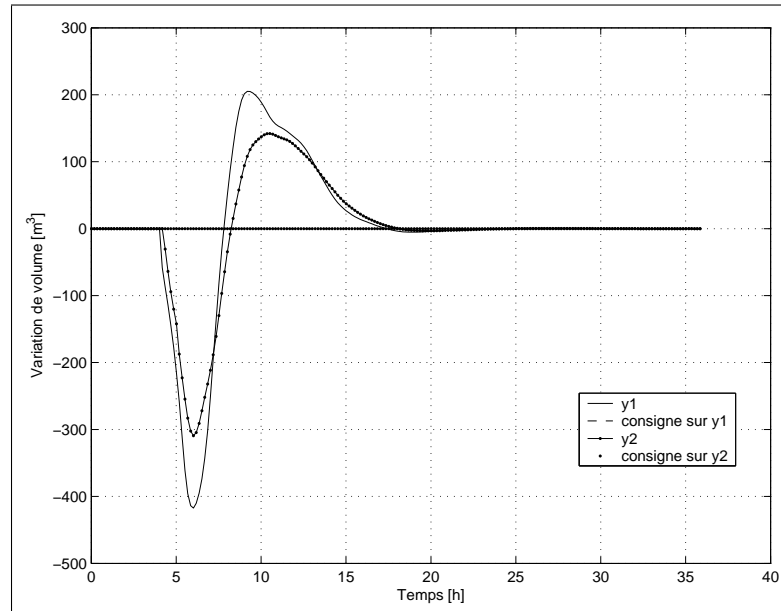


FIG. 5.13 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations – Évolution des sorties*

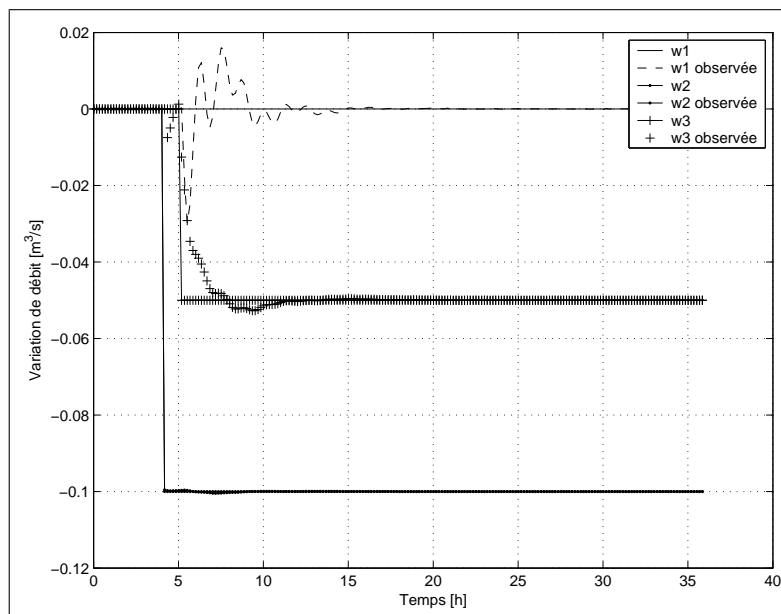


FIG. 5.14 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations – Évolution des perturbations*

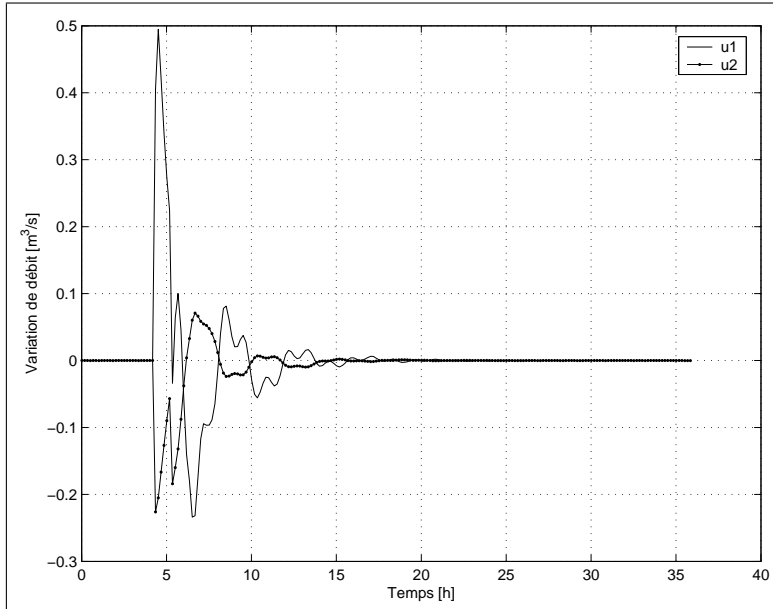


FIG. 5.15 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des commandes*

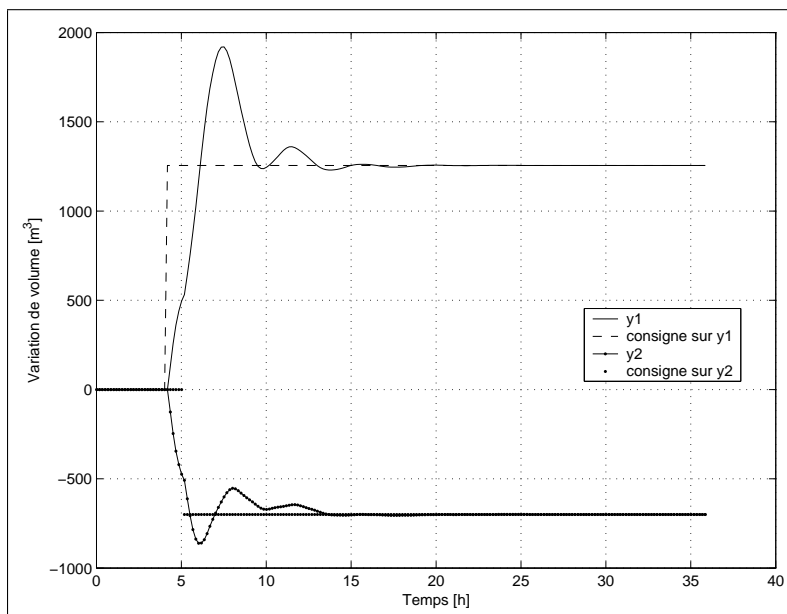


FIG. 5.16 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des sorties*

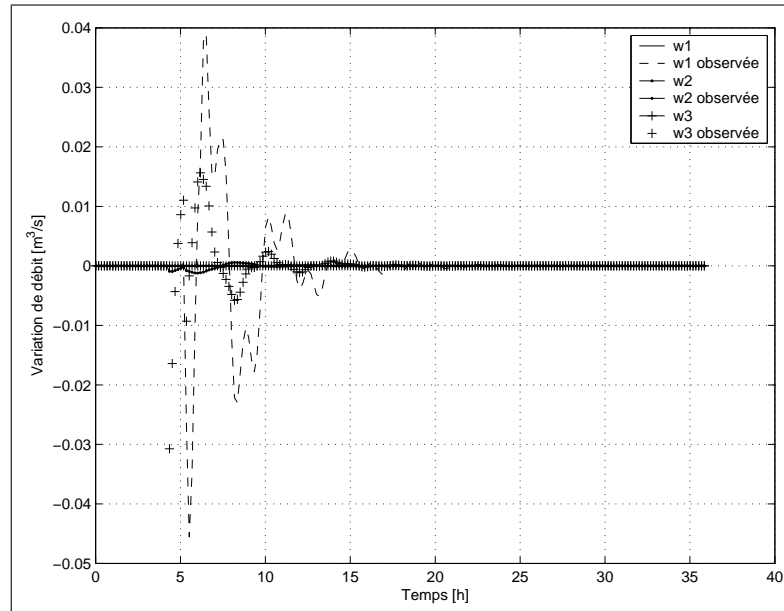


FIG. 5.17 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations*

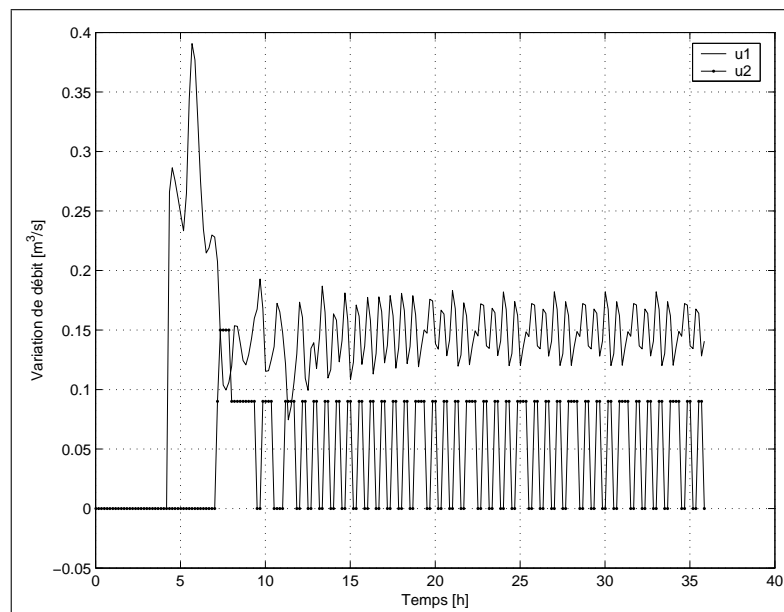


FIG. 5.18 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations – Évolution des commandes*

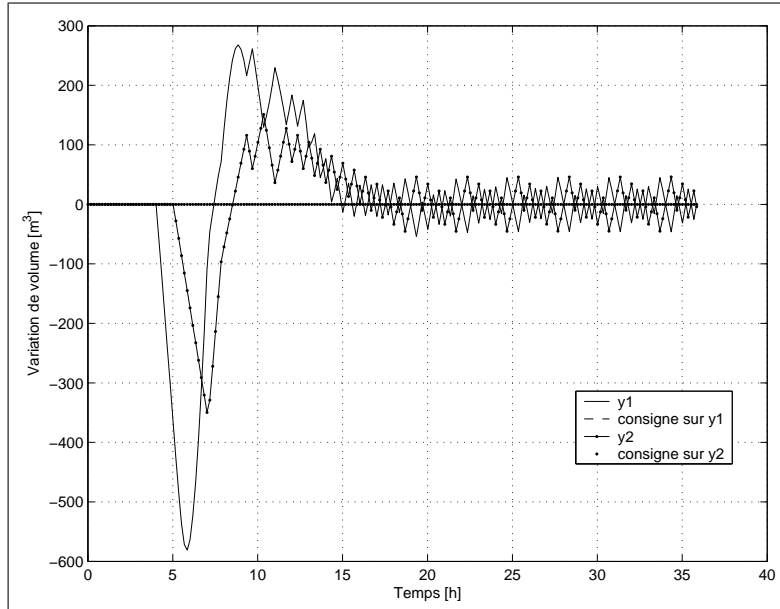


FIG. 5.19 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations – Évolution des sorties*

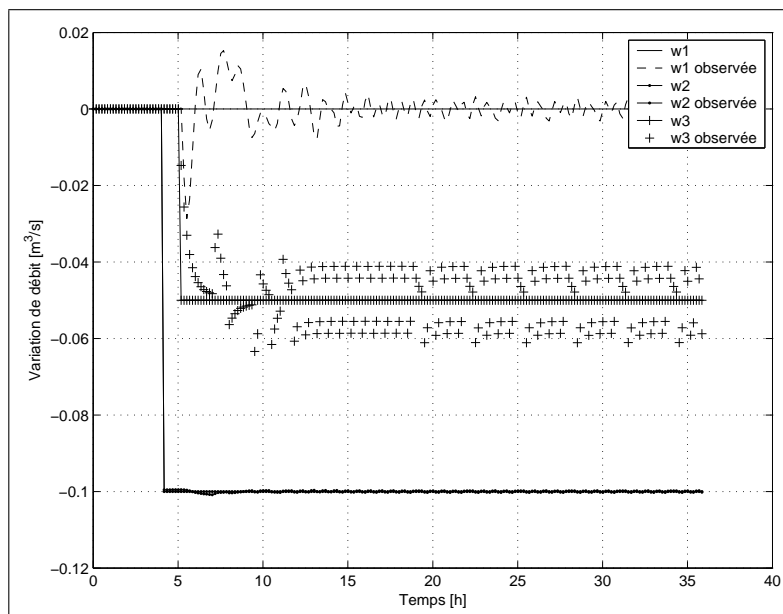


FIG. 5.20 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations – Évolution des perturbations*

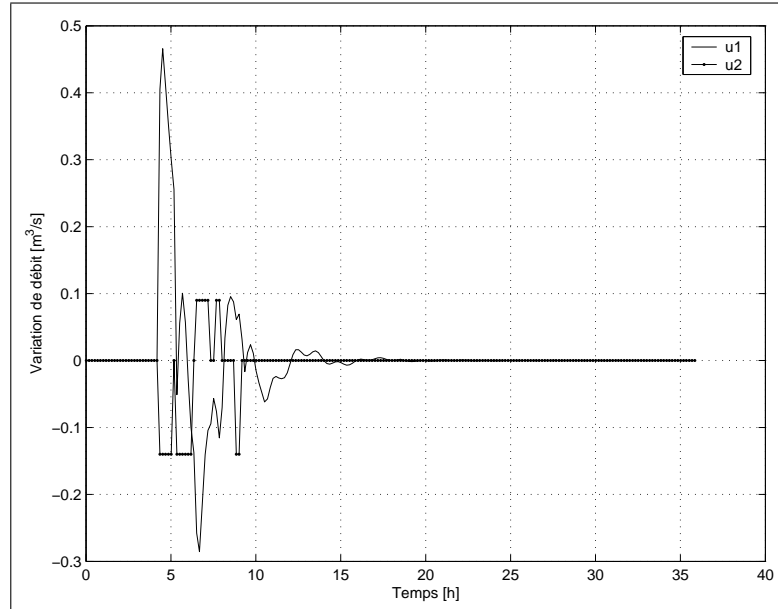


FIG. 5.21 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des commandes*

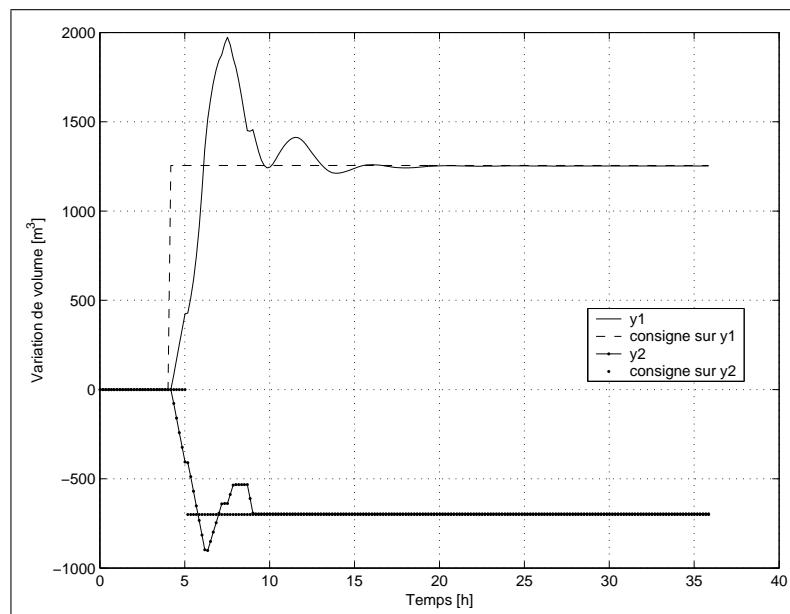


FIG. 5.22 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des sorties*

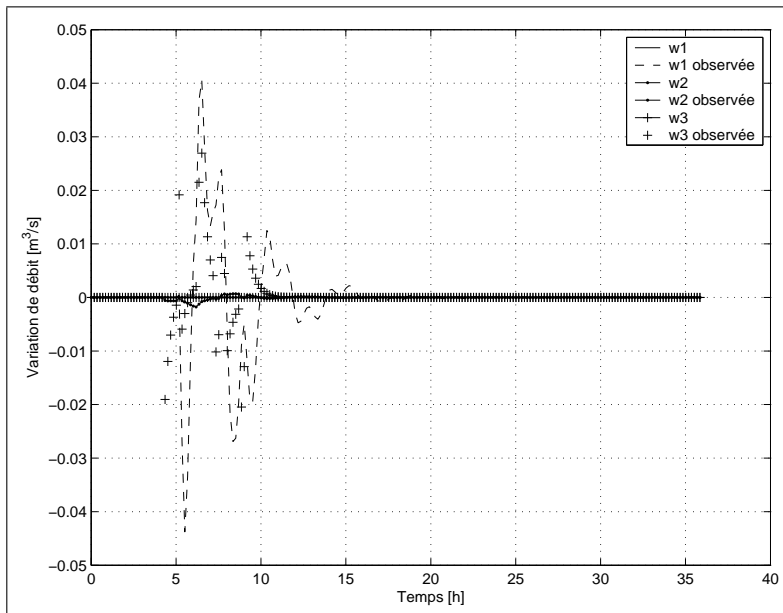


FIG. 5.23 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations*

5.8.3 Préfiltre non asymptotique

Commande continue

Rejet de perturbations sans prévision Les résultats sont donnés sur les figures 5.24, 5.25 et 5.26. Il est intéressant de les comparer avec les figures 5.12, 5.13 et 5.14 du contrôleur avec préfiltre asymptotique. Les commandes sont ici plus douces avec moins d'amplitude. En effet, bien qu'à l'instant t , la prévision soit remplacée par la perturbation reconstruite, elle n'en reste pas moins nulle sur les pas de temps futurs, et contribue donc à modérer la réponse du contrôleur. Logiquement, l'écart à la consigne sur les sorties est ici plus important, mais le retour à un état stationnaire s'effectue sans oscillation, et dans un délai comparable au cas asymptotique. La reconstruction des perturbations est quant à elle très bonne, en partie due à des variations plus douces des différentes grandeurs, entraînant une meilleure stabilité de l'observateur.

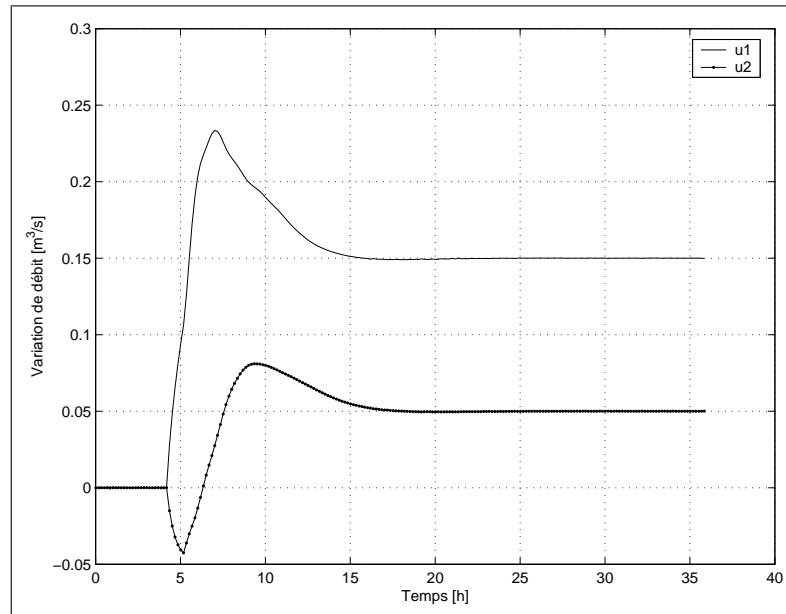


FIG. 5.24 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des commandes*

Rejet de perturbations avec prévisions Les commandes, sorties et perturbations sont données sur les figures 5.27, 5.28 et 5.29. Dans ce cas, dès que le préfiltre détecte les prélèvements prévus sur son horizon, le contrôleur anticipe sur ceux-ci, en augmentant le volume de réserve afin de faire face à la consommation. Il en résulte une variation sur les sorties deux fois plus faible que dans les cas précédents, avec une commande ne dépassant que de très peu sa valeur stationnaire à la fin de la

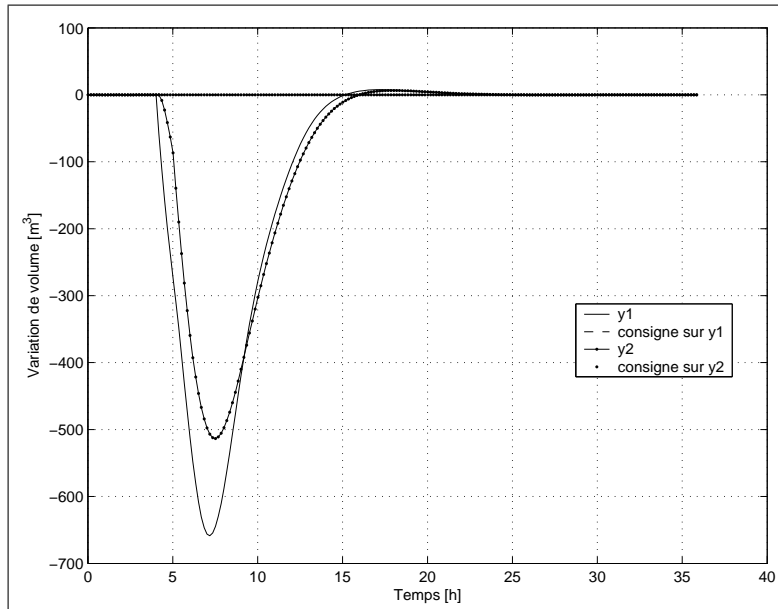


FIG. 5.25 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des sorties*

simulation. La reconstruction des perturbations est très bonne avec une convergence rapide vers leurs valeurs stationnaires.

Poursuite de consignes Les figures considérés sont ici les 5.30, 5.31 et 5.32. Il est intéressant de les comparer aux figures 5.15, 5.16 et 5.17. La prévision sur les changements de consigne permet de réduire jusqu'à dix fois les variations de commande, et d'avoir les sorties qui convergent sans oscillation. Les perturbations reconstruites sont toujours légèrement oscillantes, mais avec des valeurs très faibles.

Commande discrète

Rejet de perturbations avec prévisions Les résultats sont données sur les figures 5.33, 5.34 et 5.35. Comme dans le cas du préfiltre asymptotique, on constate que le système s'installe dans un régime oscillatoire établi. Les amplitudes des oscillations sur les sorties sont logiquement du même ordre puisqu'elles correspondent au volume fourni par la station de pompage pendant un nombre fini de pas de temps. Les dépassements de consignes pendant la période transitoire sont par contre plus faible, et sont du même ordre de grandeur que pour le cas continu.

Poursuite de consignes Les commandes, sorties et perturbations sont données sur les figure 5.36, 5.37 et 5.38. La consigne sur la deuxième sortie n'est pas atteinte

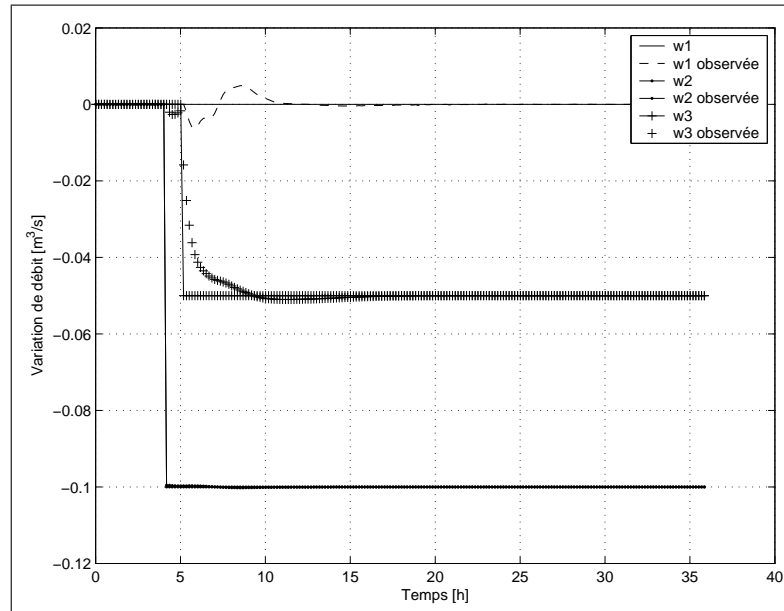


FIG. 5.26 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations sans prévision – Évolution des perturbations*

précisément, en raison du mode de fonctionnement de la station de pompage. Cependant, la convergence vers le régime établi se fait rapidement. Contrairement au cas précédent de rejet de perturbation, le nombre d'opérations sur les pompes reste ici assez limité.

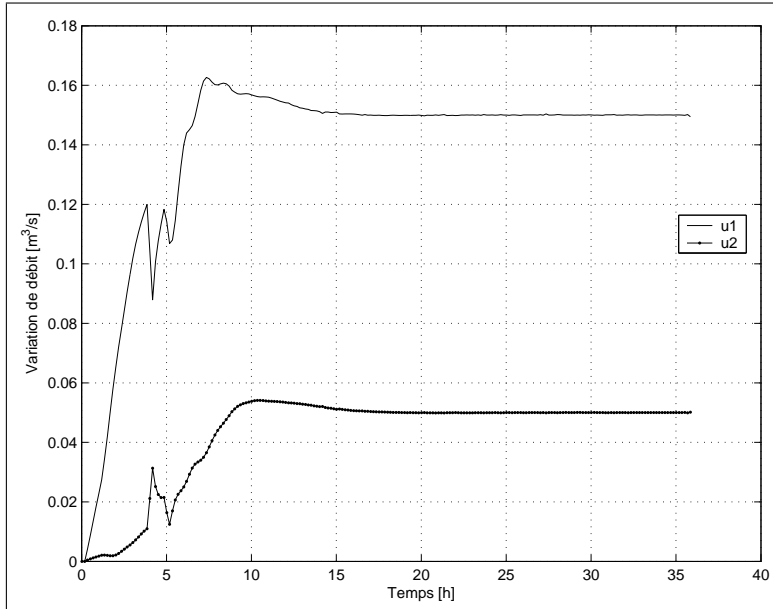


FIG. 5.27 – Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des commandes

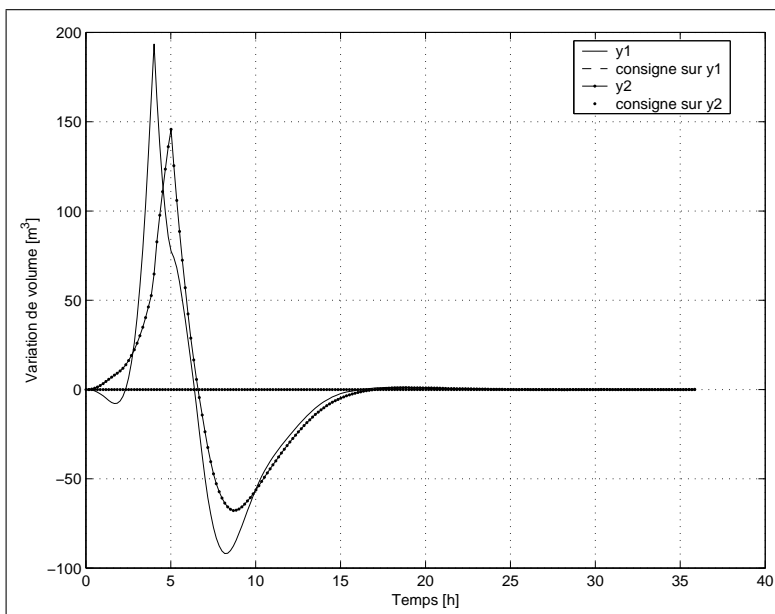


FIG. 5.28 – Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des sorties

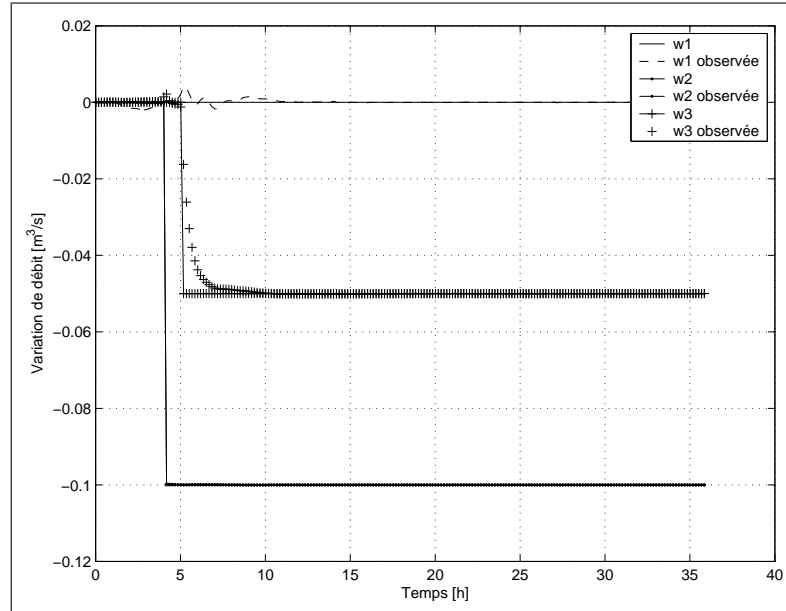


FIG. 5.29 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des perturbations*

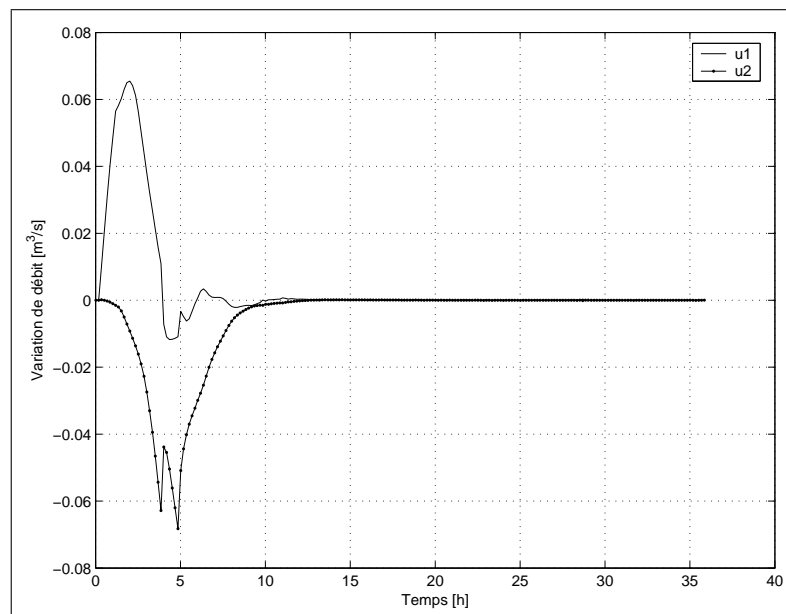


FIG. 5.30 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des commandes*

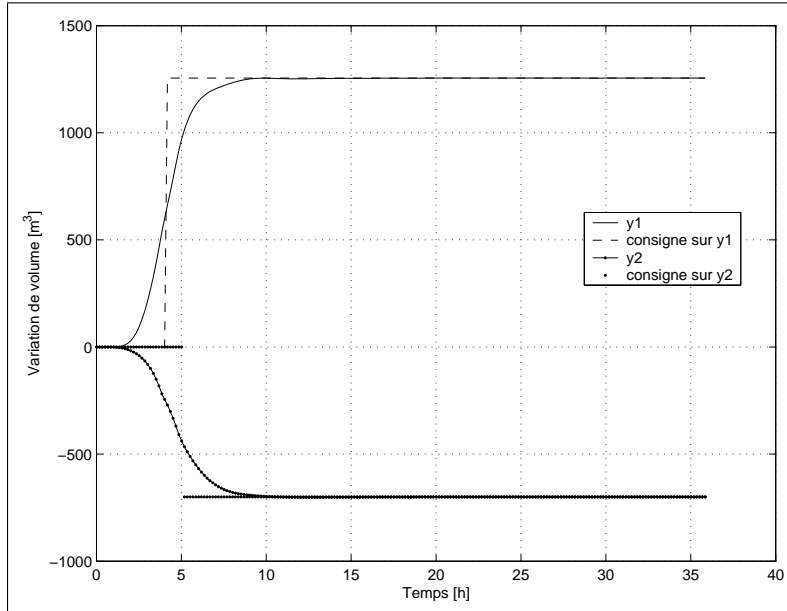


FIG. 5.31 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des sorties*

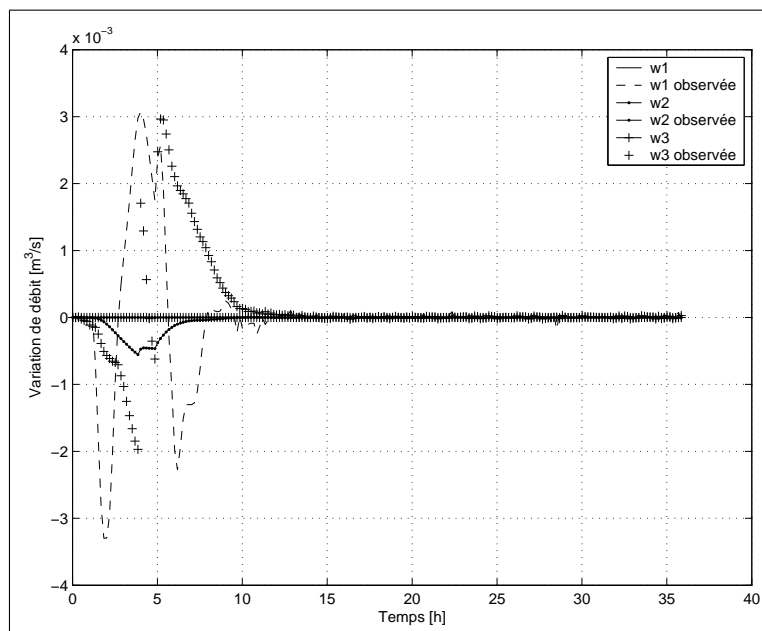


FIG. 5.32 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande continue – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations*

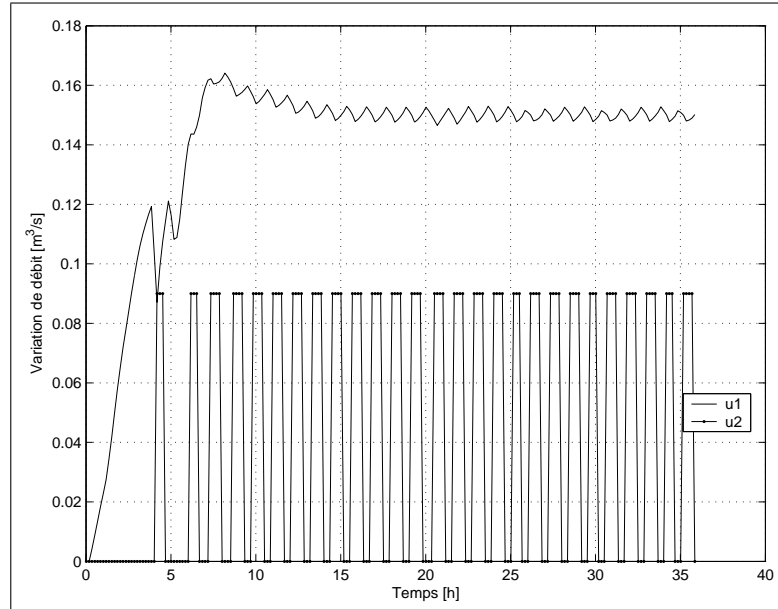


FIG. 5.33 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des commandes*

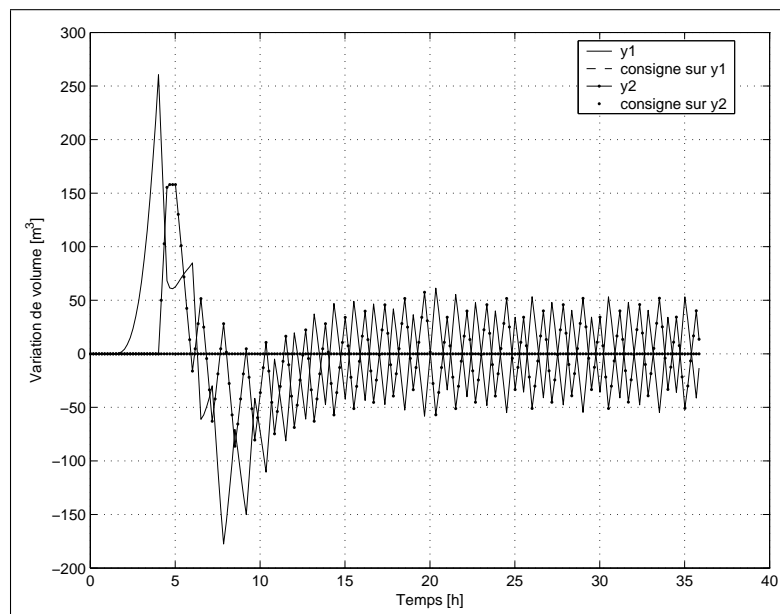


FIG. 5.34 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des sorties*

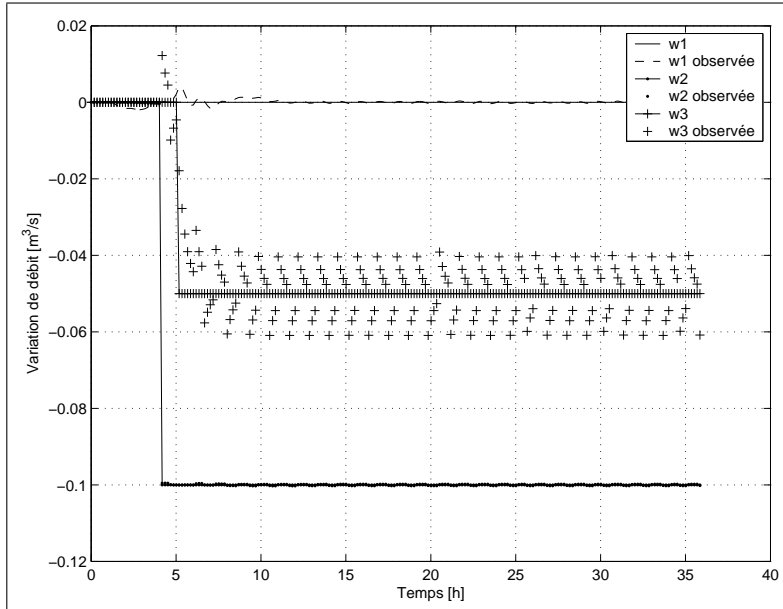


FIG. 5.35 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Rejet de perturbations avec prévisions – Évolution des perturbations*

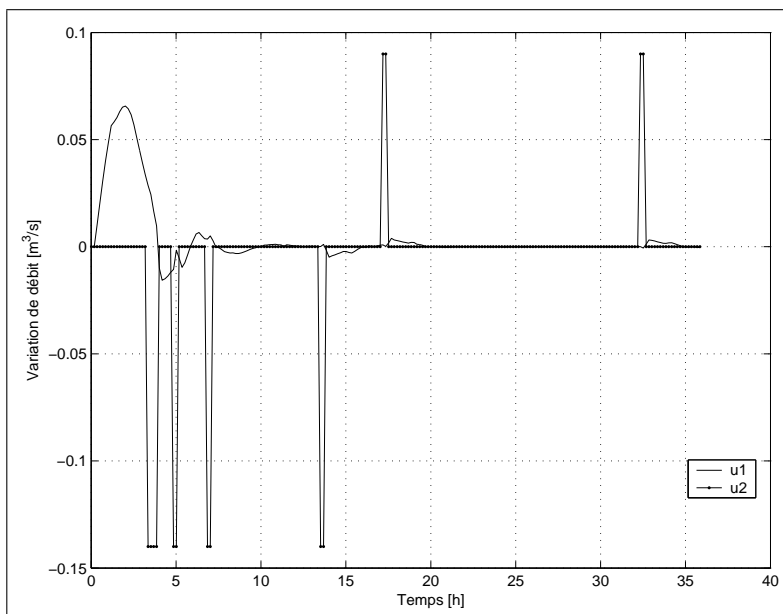


FIG. 5.36 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des commandes*

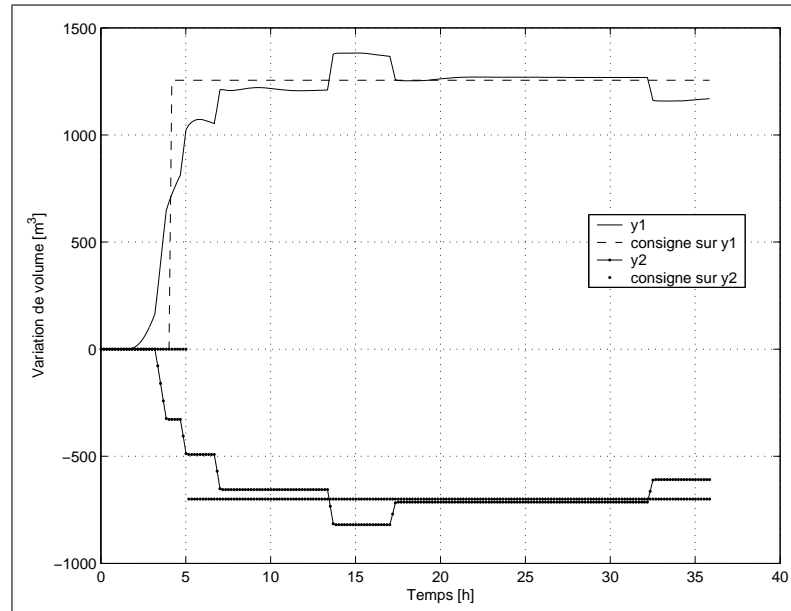


FIG. 5.37 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des sorties*

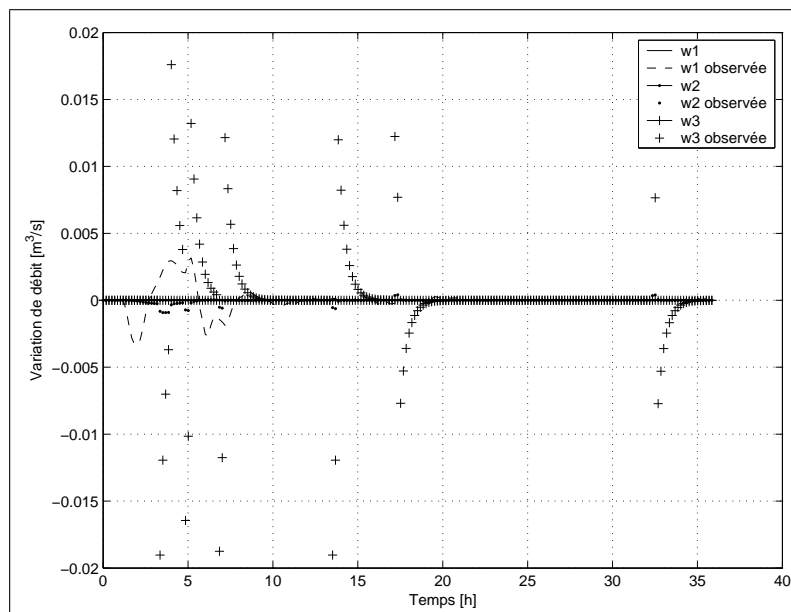


FIG. 5.38 – *Modèle non-linéaire – Préfiltre non asymptotique – Commande discrète – Poursuite de consignes – Évolution des perturbations*

5.9 Comparaison avec des mesures de terrain

5.9.1 Généralités

Pour terminer cette série de tests, nous avons souhaité tester notre contrôleur sur un scénario extrait de mesures en provenance du terrain. Nous simulerons donc le fonctionnement de la branche d'Aix Nord pendant 24 heures, à partir du 1^{er} juillet 2003 à 9^h00. À cette date, le canal est dans un régime proche du régime stationnaire, ce qui facilite l'initialisation du calcul. Les archives du CGTC² nous donnent le débit en tête du canal de la Trévaresse, à la station de pompage, les niveaux dans les deux réserves, ainsi que les débits de prise w_2 et w_4 . Nous allons donc introduire ces deux prélèvements dans le simulateur, et comparer l'évolution des autres grandeurs.

Nous utiliserons pour la commande, le contrôleur avec préfiltre non asymptotique — horizon 4 heures — sans prévision sur les prélèvements, l'observateur global, ainsi que la commande discrète de la station de pompage.

5.9.2 Simulation et commentaires

Afin d'utiliser au mieux la réserve de Collet Redon, la consigne donnée pour la sortie associée a été définie de manière à atteindre le volume bas à la fin de la journée — période de pointe — et le volume haut à la fin de la nuit — période creuse. Son évolution est donnée sur la figure 5.40 présentant les sorties. L'évolution des commandes en simulation est assez similaire à ce qui a été mis en œuvre sur le terrain. On note cependant des variations plus douces de la commande u_1 , et un débit globalement plus faible en période de pointe et plus fort en période creuse³ sur u_2 (figure 5.39). Cela se traduit par une amplitude plus importante sur les variations de volume dans la réserve de Collet Redon (figure 5.40), avec une meilleure utilisation de tout le marnage disponible entre les deux volumes de consigne. Le volume dans la réserve de la Barounette présente quant à lui moins d'amplitude dans ses variations, restant ainsi plus proche de la consigne. Pour ce qui est des perturbations (figure 5.41), les prélèvements sont bien reconstruits sur w_2 , et on remarque quelques oscillations très faibles sur w_1 et w_3 , qui ne correspondent pas à des prélèvements réels — rien n'a été introduit comme prélèvements sur ces entrées — mais qui servent ici à rejeter les erreurs de modèle. Rappelons que les perturbations sont négatives quand l'eau sort du système.

2. Centre Général de TéléContrôle

3. Les périodes sont repérées par des traits verticaux sur les graphiques

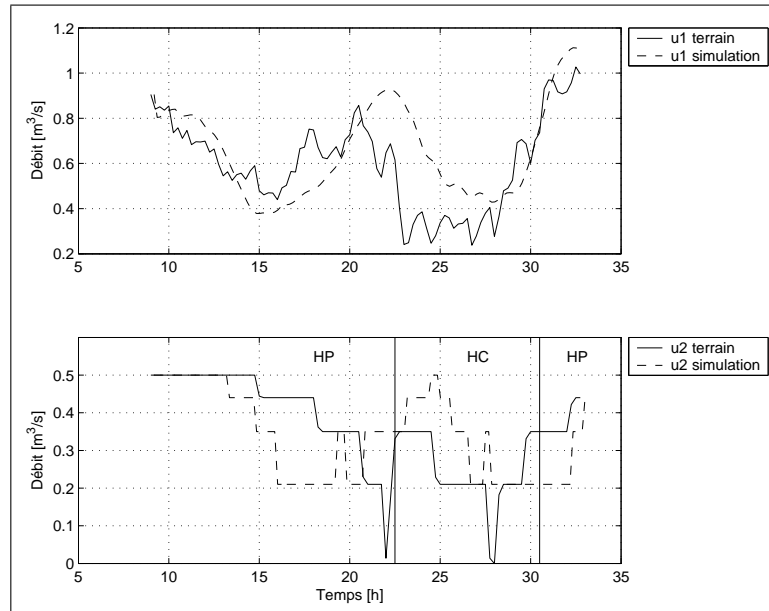


FIG. 5.39 – *Comparaison terrain – modèle — Commandes*

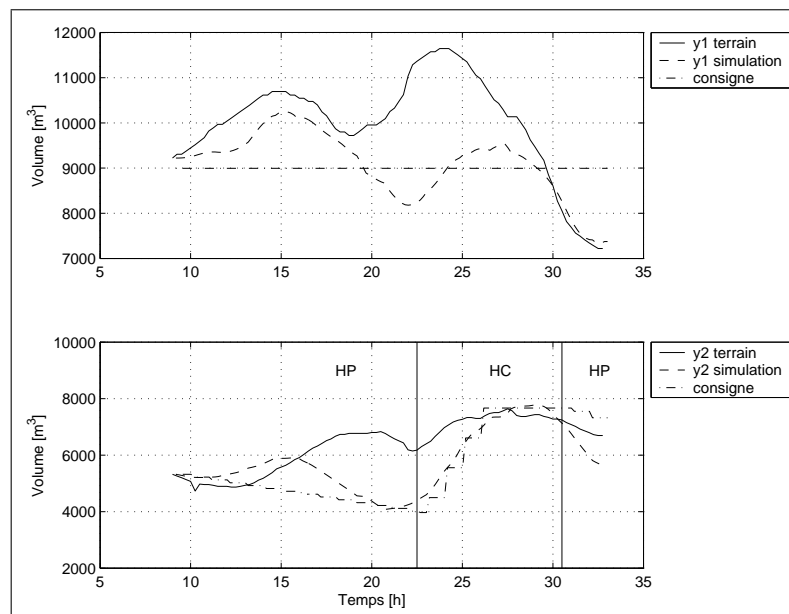


FIG. 5.40 – *Comparaison terrain – modèle — Sorties*

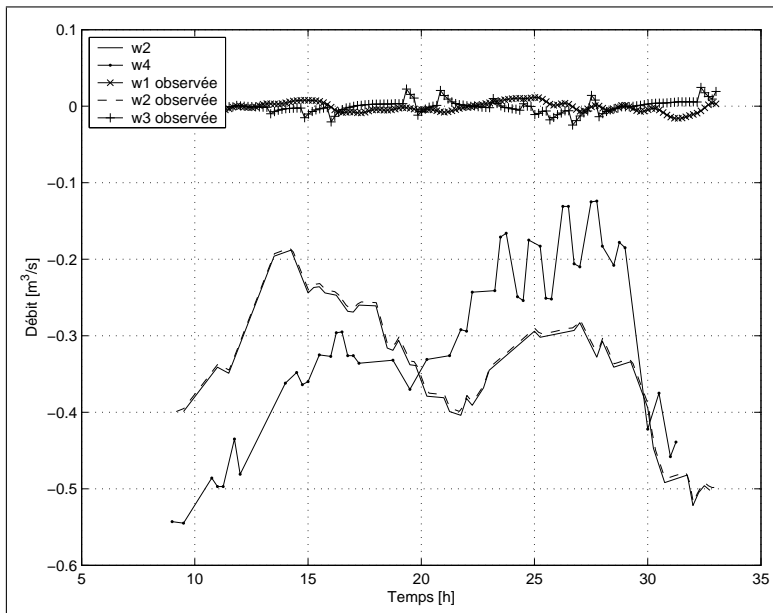


FIG. 5.41 – *Comparaison terrain – modèle — Perturbations*

5.10 Conclusions

Le test général d'un contrôleur n'est pas une tâche facile. Même si la stabilité du couple contrôleur – observateur a pu être démontrée analytiquement, même si les marges de robustesse sont correctes, il est difficile de garantir le bon fonctionnement de la régulation en terme de rapidité de réaction ou de non dépassement des extrêmes. Ces caractéristiques varient beaucoup d'un choix de paramètres à l'autre, ou même d'un scénario à l'autre. C'est pourquoi des tests sur modèle non-linéaire sont nécessaires avant de passer à l'implémentation sur le terrain. Nous avons présenté dans ce chapitre un certain nombre de tests classiques, qui permettent d'avoir une première idée des performances du contrôleur.

Les deux contrôleurs testés se sont révélés satisfaisants, la version avec préfiltre non asymptotique étant excellente dès lors que l'on dispose d'une prévision sur les consommations ou sur l'évolution des consignes.

L'observation des prélèvements à la prise des réseaux de S^t Cannat (w_2) est logiquement très bonne, puisque cette prise est située entre deux mesures de débit. La dynamique est par contre plus lente sur la reconstruction de w_3 , mais ces prélèvements restent très faibles par rapport aux débits moyens transitant dans le système.

On peut se poser la question de l'utilité de la reconstruction de w_1 . En effet, cette perturbation correspond à des infiltrations ou des arrivées d'eau de pluie qui resteront très marginales puisque le canal est revêtu et est protégé du ruissellement sur une grande partie de son linéaire par une couverture en béton. De plus, nous avons supposé qu'ils intervenaient à l'amont du canal, alors que dans la réalité, les ruissellements ou les fuites peuvent se manifester en tous points. Cependant, l'observation de cette perturbation reste un moyen de rejeter les erreurs de modèle.

Le post-traitement effectué pour la commande de la station de pompage n'a pas engendré de déstabilisation du système, et les résultats obtenus sont convaincants. La robustesse du contrôleur est suffisante pour garantir un bon fonctionnement malgré les perturbations introduites par ce traitement.

Chapitre 6

Conclusion générale et perspectives

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de la régulation automatique des canaux d'irrigation. Même si de nombreux ouvrages de transport d'eau à surface libre existent dans le monde, très peu sont exploités de manière automatique. La recherche dans ce domaine existe, mais les résultats ne sont que très rarement appliqués sur des systèmes réels.

Nous avons pu montrer ici qu'il était possible d'appliquer la théorie de la commande optimale sur un système hydraulique dont le fonctionnement complexe intègre des contraintes qui ne sont pas gérées classiquement par ce type de commande. Le nombre de paramètres de calage, même s'il n'est pas négligeable, reste cependant raisonnable. Il existe une interprétation physique pour chacun d'eux, ce qui rend alors leur détermination plus aisée. Le contrôleur testé existe dans deux versions, une version avec préfiltre asymptotique plus simple de mise en œuvre, et une version avec préfiltre non-asymptotique pour la prise en compte des perturbations prévues et des trajectoires de consigne à venir sur un horizon fini. La commande optimale étant appliquée sur un retour d'état, un observateur est construit, qui estime le vecteur d'état à chaque pas de temps, et qui peut également estimer les perturbations inconnues à partir des mesures disponibles sur le système.

Le but de ce travail de recherche était d'utiliser une commande multivariable pour la régulation d'un ouvrage existant. L'implémentation de ce contrôleur, dans le logiciel de régulation dynamique n'a pas été réalisée. Cependant, toute la synthèse a été faite, les coefficients calés, et quelques tests effectués. La suite du travail consisterait donc à tester le contrôleur sur d'autres scénarios réels, avant d'écrire en langage JAVA le code permettant d'inclure la régulation multivariable dans la régulation dynamique. Les cas de fonctionnement en modes dégradés devront également être envisagés, en accord avec la gestion des différents cas qui existent déjà dans le logiciel.

De plus, la solution adoptée ici pour la commande n'est plus optimale du fait

des hypothèses sur les perturbations, et surtout de la conversion en valeurs discrètes des commandes envoyées à la station de pompage. Il serait intéressant de comparer cette solution à celle calculée par un logiciel capable de résoudre des problèmes d'optimisation mixte. Une approche du type *systèmes hybrides* pourrait aussi être envisagée.

Notons enfin que le présent travail a donné lieu à une communication [VMD⁺04] lors de la deuxième conférence internationale de l'USCID ¹ intitulée *Water rights and related water supply issues*.

1. US Committee on Irrigation and Drainage

Annexe A

Gestion de la station de pompage

Les tableaux suivants présentent les performances des différentes méthodes de gestion de la station de pompage. Elles sont établies sur modèle linéaire, sur une simulation de 72 heures, et un scénario de rejet de perturbation — $-0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ sur w_2 et $-0.085 \text{ m}^3/\text{s}$ sur w_4 . Le contrôleur est pourvu d'un préfiltre non asymptotique, d'horizon 24 pas de temps — pas de temps de 600 secondes — et sans prévision sur les perturbations. Il est calculé avec les pondérations suivantes: $R_u = \begin{pmatrix} 2.25 & 0 \\ 0 & 40 \end{pmatrix}$, $Q_y = \begin{pmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}$ et $Q_I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Il n'y a pas d'observateur.

La première colonne donne le coefficient de report Cr , la deuxième indique l'horizon sur lequel est effectué le report. Les deux dernières colonnes présentent les indicateurs de performance : écart-type par rapport à la consigne en régime oscillatoire établi, et nombre de mise en route sur toute la durée de la simulation.

Les quatre tableaux suivants présentent successivement :

- sélection du débit inférieur : tableau A.1 ;
- sélection du débit le plus proche : tableau A.2 ;
- sélection du débit par paliers : tableau A.3 ;
- sélection du débit par paliers décentrés tableau A.4.

TAB. A.1 – *Sélection du débit inférieur*

C_r	Horizon	Écart-type	Nb mise en route
0	1	29,72	10
-2	1	14,23	22
-1	1	14,87	21
-0,5	1	17,63	18
0,5	1	29,73	11
1	1	35,84	9
2	1	45,60	13
-2	12	15,86	17
-1	12	14,19	18
-0,5	12	29,09	11
0,5	12	34,66	10
1	12	47,55	8
2	12	77,01	5
-2	24	15,45	19
-1	24	22,39	14
-0,5	24	29,97	12
0,5	24	30,69	10
1	24	35,08	10
2	24	50,72	7

TAB. A.2 – *Sélection du débit le plus proche*

C_r	Horizon	Écart-type	Nb mise en route
0	1	29,39	10
-2	1	17,33	21
-1	1	16,64	19
-0,5	1	17,73	17
0,5	1	35,29	8
1	1	47,07	6
2	1	58,99	5
-2	12	17,08	19
-1	12	14,18	17
-0,5	12	18,89	14
0,5	12	33,56	10
1	12	49,32	8
2	12	74,45	5
-2	24	41,76	15
-1	24	14,95	15
-0,5	24	29,52	10
0,5	24	33,50	10
1	24	41,30	10
2	24	58,35	6

TAB. A.3 – *Sélection du débit par paliers*

C_r	Horizon	Écart-type	Nb mise en route
0	1	29,39	12
-2	1	14,47	21
-1	1	19,42	20
-0,5	1	20,71	18
0,5	1	35,29	10
1	1	43,69	9
2	1	58,47	6
-2	12	17,28	21
-1	12	14,53	20
-0,5	12	29,72	11
0,5	12	39,25	10
1	12	38,30	10
2	12	73,30	4
-2	24	45,53	15
-1	24	14,86	17
-0,5	24	30,95	10
0,5	24	31,96	12
1	24	40,34	10
2	24	61,89	7

TABLE A.4 – *Sélection du débit par paliers décentrés*

C_r	Horizon	Écart-type	Nb mise en route
0	1	35,31	10
-2	1	16,56	23
-1	1	20,59	21
-0,5	1	26,45	18
0,5	1	32,40	10
1	1	49,11	7
2	1	58,00	6
-2	12	18,21	19
-1	12	14,53	20
-0,5	12	29,09	13
0,5	12	40,80	10
1	12	54,71	7
2	12	76,84	4
-2	24	36,78	15
-1	24	22,56	15
-0,5	24	29,63	11
0,5	24	34,95	11
1	24	47,16	10
2	24	65,14	7

Annexe B

Liste des symboles utilisés

Les différentes notations employées dans ce mémoire sont listées ici dans l'ordre alphabétique, mises à part certaines variables locales qui ont été omises. Certaines définitions emploient la même notation, mais le contexte dans lequel elles sont utilisées doit permettre de lever toutes ambiguïtés.

A	Section mouillée
A_e	Matrice dynamique de l'observateur
A_s	Matrice d'état
B	Largeur au miroir
B_I	Matrice de l'intégrateur
B_s	Matrice de commande
B_u	Partie commandes de B_s
B_w	Partie perturbations de B_s
B_{w_c}	Partie perturbations connues de B_w
B_{w_i}	Partie perturbations inconnues de B_w
C_r	Coefficient de report
C_s	Matrice d'observation
C_y	Partie variables contrôlées de C_s
C_z	Partie variables mesurées de C_s
D	Débitance
D	Fonction de transfert du contrôleur de la régulation dynamique
D	Coefficient de la fonction de transfert F_{QQ}
D_s	Matrice de transition
D_u	Partie commandes de D_s

D_w	Partie perturbations de D_s
D_y	Partie variables contrôlées de D_s
D_{yu}	Partie commandes et variables contrôlées de D_s
D_{yw}	Partie perturbations et variables contrôlées de D_s
D_z	Partie variables mesurées de D_s
D_{zu}	Partie commandes et variables mesurées de D_s
D_{zw}	Partie perturbations et variables mesurées de D_s
D_{zwc}	Partie perturbations connues de D_{zw}
D_{zwi}	Partie perturbations inconnues de D_{zw}
D_{1c}	Coefficient de la fonction de transfert D
D_{2c}	Coefficient de la fonction de transfert D
D_{1v}	Coefficient de la fonction de transfert H
E	Coefficient de diffusion
e	Vecteur contenant les prévisions sur les perturbations et les consignes
e_o	Erreur de reconstruction de l'état
\mathcal{F}	Nombre de Froude
F_{arx}	Fonction de transfert débit – débit du modèle ARX
F_H	Fonction de transfert débit – débit du deuxième ordre, approchant le modèle d'Hayami
F_{Hayami}	Fonction de transfert débit – débit d'ordre infini du modèle d'Hayami
F_{QQ}	Fonction de transfert débit – débit d'ordre deux avec retard
F_{QV}	Fonction de transfert débit – volume
F_1	Fonction de transfert débit amont – débit aval du canal de la Trévarresse
F_2	Fonction de transfert débit – volume de la réserve de la Barounette
F_3	Fonction de transfert débit – volume de la réserve de Collet Redon
G	Matrice de transfert du système multivariable
\tilde{G}	Dynamique réel du système
G_{yu}	Matrice de transfert commandes – sorties contrôlées
G_{yw}	Matrice de transfert perturbations – sorties contrôlées
G_{zu}	Matrice de transfert commandes – sorties mesurées
G_{zw}	Matrice de transfert perturbations – sorties mesurées
g	Accélération de la pesanteur

H	Fonction de transfert débit – volume de la régulation dynamique
H	Préfiltre non asymptotique de la commande
H_s	Horizon statistique
h	Hauteur d'eau
\mathbb{I}	Matrice identité
J	Critère quadratique permettant de calculer la commande
K	Matrice de gain de la commande
K_D	Gain de la fonction de transfert D
K_p	Gain de la fonction de transfert H
K_S	Nombre de Strickler
k	Taux de variation du débit sur une prise
\bar{k}	Moyenne du taux de variation de débit sur la période de stabilisation
L	Longueur du bief
L	Matrice de gain de l'observateur d'état
L_i	Matrice de gain de l'observateur de prélèvements
M_e	Matrice de gain sur e du préfiltre asymptotique
M_{e_w}	Partie perturbations de M_e
M_{e_I}	Partie consignes de M_e
M_u	Matrice de gain sur u_c du préfiltre asymptotique
M_X	Matrice de gain sur $\begin{pmatrix} X_c \\ X_{I_c} \end{pmatrix}$ du préfiltre asymptotique
M_{X_I}	Matrice de gain sur X_{I_c} du préfiltre asymptotique
M_y	Matrice de gain sur y_c du préfiltre asymptotique
N	Coefficient de la fonction de transfert F_{QQ}
N_1	Coefficient de la fonction de transfert D
nu	Nombre de commandes
nw	Nombre de perturbations
nx	Dimension du vecteur d'état
ny	Nombre de variables contrôlées
nz	Nombre de variables mesurées
P	Solution de l'équation de Riccati
P_s	Période statistique
P_1	Premier pôle double de la boucle fermée (régulation dynamique)
P_2	Deuxième pôle double de la boucle fermée (régulation dynamique)

Q	Débit
Q_{ajust}	Débit d'ajustement à une prise
Q_I	Pondérations sur les composantes intégrée de l'état
Q_{prev}	Débit de prévision à une prise
Q_X	Pondérations sur l'état
Q_{Xf}	Pondérations sur l'état final
Q_y	Pondérations sur les sorties
\bar{q}	Débit moyen à une prise sur la période de stabilisation
q_{y_i}	Composantes de Q_y
R	Rayon hydraulique
R	Pondérations sur les commandes
R_u	Pondérations sur les commandes
r	Retard pur
r_{u_i}	Composantes de R_u
S_f	Pente de frottement
S_i	Fonction de sensibilité de du sur u
S_o	Pente du radier
S_o	Fonction de sensibilité de dy sur y
s	Variable de Laplace
T	Constante de temps du filtre dans la fonction de transfert H
T	Temps de réponse à un échelon dans F_{QQ}
T_c	Temps de correction du contrôleur de la régulation dynamique
T_e	Pas de temps d'échantillonnage
T_H	Retard de propagation du débit sur un bief
T_H^p	Retard de propagation prévisionnel
T_i	Fonction de sensibilité de du sur u'
T_o	Fonction de sensibilité de dy sur y'
t	Variable de temps
U	Vecteur d'entrée comportant les commandes et les perturbations
u	Vecteur des commandes
u_c	Consignes sur les commandes
u_1	Variable de commande – Débit amont du canal de la Trévaresse

u_2	Variable de commande – Débit à la station de pompage de la Barounette
u_{2_c}	Commande u_2 calculée par le contrôleur
u_{2_r}	Commande u_2 réglée à la station de pompage
u^*	Commande optimale
V	Volume
v	Vitesse de l'écoulement
w	Vecteur des perturbations
w_c	Perturbations connus
w_i	Perturbations inconnus
\hat{w}_i	Perturbations inconnus observés
w_1	Perturbation – Ruissellement ou fuite dans le canal de la Trévaresse
w_2	Perturbation – Prise du réseau de S ^t Cannat
w_3	Perturbation – Prise pour usages divers
w_4	Perturbation – Pompage vers la réserve de la Pomme
X	Vecteur d'état
\hat{X}	Vecteur d'état observé
X_c	Consigne sur l'état
X_I	Composantes intégrées de l'état
x	Variable d'espace, abscisse le long du canal
Y	Vecteur de sortie comportant les variables contrôlées et les mesures
y	Vecteur des sorties contrôlées
y_c	Consignes sur les sorties
y_1	Variable contrôlée – Volume dans la réserve de la Barounette
y_2	Variable contrôlée – Volume dans la réserve de Collet Redon
z	Cote de l'eau
z	Variable des fonctions de transfert discrètes
z	Vecteur des sorties mesurées
z_1	Variable mesurée – Débit aval du canal de la Trévaresse
z_2	Variable mesurée – Volume dans la réserve de la Barounette
z_3	Variable mesurée – Débit de sortie de la réserve de la Barounette
z_4	Variable mesurée – Volume dans la réserve de Collet Redon
Δ	Facteur portant sur l'incertitude ω_p

Θ	Vitesse de convection
ω_n	Pulsation du modèle F_H
Ω_p	Incertitude maximale sur le modèle du système
ξ	Amortissement du modèle F_H

Bibliographie

- [ÅW84] K.J. Åström et B. Wittenmark. *Computer Controlled Systems – Theory and Design*. Prentice-Hall Information and System Sciences. Thomas Kailath, 1984.
- [BBM98] M. Branicky, V. Borkar, et S. Mitter. « A unified framework for hybrid control: model and optimal control theory ». *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(1):31–45, janvier 1998.
- [BBM02] A. Bemporad, F. Borrelli, et M. Morari. « On the optimal control law for linear discrete time hybrid systems ». Dans *5th International Workshop, Hybrid Systems: Computation and Control*, Stanford, California – USA, mars 2002.
- [Blo02] F. Blot. « Enjeux de l’eau en Espagne et autour de la Méditerranée », décembre 2002. Café géographique.
- [BM99] A. Bemporad et M. Morari. « Control of systems integrating logic, dynamics and constraints ». *Automatica*, 35:407–427, 1999.
- [BMDP02] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, et E.N. Pistikopoulos. « The explicit linear quadratic regulator for constrained systems ». *Automatica*, 38:3–20, 2002.
- [BSV71a] A.J.C. Barré de Saint Venant. « Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l’introduction des marées dans leur lit ». *Comptes rendus des séances de l’Académie des Sciences*, 73:147–154, 1871.
- [BSV71b] A.J.C. Barré de Saint Venant. « Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l’introduction des marées dans leur lit ». *Comptes rendus des séances de l’Académie des Sciences*, 73:237–240, 1871.
- [Büh83] H. Bühler. *Réglages échantillonnés*, volume 2 : Traitement dans l’espace d’état. Presses Polytechniques Romandes, 1983.
- [CHV80] J.A. Cunge, F.M. Holly, et A. Verwey. *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman, 1980.
- [Del88] J.L. Deltour. « La régulation des systèmes d’irrigation ». Rapport de DEA, Société du Canal de Provence et d’Aménagement de la Région Provençale, septembre 1988.

- [Del92] J.L. Deltour. « *Application de l'automatique numérique à la régulation des canaux - Proposition d'une méthodologie d'étude* ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, février 1992.
- [EMV98] M. Ennabli, J. Margat, et D. Vallée. « Pour prévenir les crises de l'eau en méditerranée, priorité à une meilleure maîtrise des demandes ». Dans *Eau et développement durables*, Paris, mars 1998.
- [GL02] D. Georges et X. Litrico. *Automatique pour la gestion des ressources en eaux*. Systèmes automatisés. Hermès, 2002.
- [Lan93] I.D. Landau. *Identification et commande des systèmes*. Traité des Nouvelles Technologies – Série Automatique. HERMES, seconde édition, 1993.
- [Lar93] Ph. De Larminat. *Commande des systèmes linéaires*. Traité des Nouvelles Technologies – Série Automatique. HERMES, 1993.
- [LF02] X. Litrico et V. Fromion. « Infinite dimensional modeling of open-channel hydraulic systems for control purposes ». Dans *41th conf. on decision and control*, pages 1681–1686, Las Vegas, Nevada – USA, 2002. IEEE.
- [Lit99] X. Litrico. « *Modélisation, identification et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre* ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, janvier 1999.
- [Lju87] L. Ljung. *Systeme identification: Theory for the user*. Information and system sciences series. PTR Prentice Hall, 1987.
- [Ma194] P.O. Malaterre. « *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation* ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 1994.
- [Ma198] P.O. Malaterre. « "PILOTE": linear quadratic optimal controller for irrigation canals ». *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4):187–194, juillet/aout 1998.
- [Ma103] P.O. Malaterre. « Le contrôle automatique des canaux d'irrigation : état de l'art et perspectives ». Dans *Colloque Automatique et Agronomie*, Montpellier – France, janvier 2003. INRA.
- [Mar84] M. Marié. « Le Canal de Provence ». *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 21, 1984.
- [MK00] P.O. Malaterre et M. Khammash. « l_1 controller design for a high-order 5-pool irrigation canal system ». Dans *CDC conference*. IEEE, décembre 2000.
- [MRS98] P.O. Malaterre, D.C. Rogers, et J. Schuurmans. « Classification of canal control algorithms ». *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(1):3–10, janvier/février 1998.
- [OSB03] P.J. van Overloop, W. Schuurmans, et R. Brouwer. « Model predictive control of canal systems in the Netherlands ». Dans *Second International Conference on Irrigation and Drainage*, Phoenix, Arizona – USA, mai 2003. USCID.

-
- [Ous94] A. Oustaloup. *La robustesse*. Traité des Nouvelles Technologies – Série Automatique. HERMES, 1994.
- [PCS98] J.C. Pagès, J.M. Compas, et J. Sau. « MIMO predictive control with constraints by using an embedded knowledge based model ». Dans *Int. Conf. on system, man & cybernetics*, pages 3902–3907, San Diego, California – USA, octobre 1998. IEEE.
- [SAAM90] S. Sawadogo, A.K. Achaibou, J. Aguilar-Martin, et F. Mora-Camino. « An application of adaptative predictive control to water distribution systems ». Rapport de recherche 90304, LAAS-CNRS, octobre 1990.
- [San97] F. Sanfilippo. « *Application de l'automatique multivariable à la régulation des canaux - Comparaison avec une approche monovariante* ». Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon 1, octobre 1997.
- [SDS02] F. Sanfilippo, J.L. Deltour, et J. Sau. « *Automatique pour la gestion des ressources en eaux* », Chapitre 5.2: La régulation dynamique au Canal de provence, pages 239–245. Hermes, 2002.
- [SFM01] S. Sawadogo, R.M. Faye, et F. Mora-Camino. « Decentralized adaptive predictive control of multireach irrigation canal ». Rapport de recherche 01422, LAAS-CNRS, septembre 2001.
- [SFMM98] S. Sawadogo, R.M. Faye, P.O. Malaterre, et F. Mora-Camino. « Decentralized predictive controller for delivery canals ». Dans *Int. Conf. on system, man & cybernetics*, pages 3880–3884, San Diego, California – USA, octobre 1998. IEEE.
- [SICa] CEMAGREF. « *SIC Documentation théorique* ».
- [SICb] CEMAGREF. « *SIC Documentation utilisateur* ».
- [VDSS03] Y. Viala, J.L. Deltour, F. Sanfilippo, et J. Sau. « A Smith predictor implementation for volume control on a Canal de Provence branch ». Dans *Second International Conference on Irrigation and Drainage*, Phoenix, Arizona – USA, mai 2003. USCID.
- [Via01] Y. Viala. « Etude et mise en œuvre de la régulation dynamique des canaux d'irrigation ». Rapport de DEA, Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale, juillet 2001.
- [VMD+04] Y. Viala, P.O. Malaterre, J.L. Deltour, F. Sanfilippo, et J. Sau. « A multi-variables approach for the command of Canal de Provence Aix Nord water supply subsystem ». Dans *Water rights and related water supply issues*, Salt Lake City, Utah – USA, octobre 2004. USCID.
- [WB03] G. Welch et G. Bishop. « An introduction to the Kalman filter ». Rapport technique 95-041, Department of computer science – University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina – USA, mai 2003.

Résumé : Depuis plus de trente ans, la Société du Canal de Provence gère ses ouvrages grâce à la *régulation dynamique*. L'intégration d'une commande multivariable permettra une optimisation globale du système.

Le développement est effectué sur la branche d'Aix Nord du canal de Provence. Un modèle non-linéaire est construit et calé sur des mesures de terrain.

Le contrôleur optimal développé est proposé dans une version asymptotique, et dans une version comportant un préfiltre non-asymptotique pour la prévision. Un observateur d'état est également défini, ainsi qu'un observateur de prélèvements inconnus. La robustesse de l'ensemble contrôleur – observateur est testée. Le système étudié comportant une station de pompage à commande discrète, une méthode de gestion de cet ouvrage est définie.

Des tests classiques sur modèle permettent d'étudier le comportement du contrôleur. Enfin, la commande est comparée au contrôleur actuellement en fonction sur un scénario extrait des archives.

Mots clefs : canal, irrigation, automatique, commande optimale, commande discrète, robustesse.

Abstract: "Société du Canal de Provence" has been managing its hydraulic network thanks to the *dynamic regulation* for more than thirty years. The integration of a multivariable automatic controller, based on optimal control, will allow an overall optimization of the system.

The development is made on the "Aix Nord" subsystem of the "Canal de Provence". A non-linear model is built, calibrated and validated with field measurements.

The controller is proposed in two versions: an asymptotic one, and another one with a non-asymptotic component allowing to take into account predictions on future disturbances or objectives. A state observer and a perturbation observer are also defined.

Robustness of both controller and observer is tested. A method for discrete control of pumping station is also defined.

Classical tests on model allow studying of the behaviour of the controller. Finally, the new controller is compared to the current one in use on an example extracted from the backup files.

Keywords: canal, irrigation, automatic, optimal control, discrete control, robustness.