



HAL
open science

Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande des systèmes hydrauliques à surface libre

X. Litrico

► **To cite this version:**

X. Litrico. Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande des systèmes hydrauliques à surface libre. Sciences de l'environnement. Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, Comité ELESA : Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, 2007. tel-02589207

HAL Id: tel-02589207

<https://hal.inrae.fr/tel-02589207>

Submitted on 15 May 2020

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.

Institut National Polytechnique de Grenoble

Comité ELESA – Électronique, Électrotechnique, Automatique et
Traitement du Signal

Mémoire présenté pour obtenir

l'Habilitation à Diriger des Recherches

par

Xavier LITRICO

UMR G-EAU, Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages
Cemagref Montpellier

Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande de systèmes hydrauliques à surface libre

HDR soutenue le 9 mars 2007 à Grenoble devant le jury suivant :

Pierre BERNHARD	Professeur, Polytech'Nice	Rapporteur
Guy BORNARD	Directeur de Recherches, LAG-CNRS	Rapporteur
Didier GEORGES	Professeur, INPG	Examineur
Forrest HOLLY	Professeur, University of Iowa	Rapporteur
Claude MILLIER	Directeur Scientifique, ENGREF	Examineur
Jacques SAU	Professeur, Université Lyon I	Examineur

Remerciements

La rédaction d'une Habilitation à Diriger des Recherches est un exercice individuel, mais la recherche au quotidien est le fruit d'un travail d'équipe. Je remercie donc très sincèrement tous les collègues, thésards et stagiaires qui ont participé aux discussions animées qui font le sel de la recherche. Je ne les nommerai pas tous, mais je pense bien sûr à mes voisins de bureau au Cemagref, avec par ordre d'apparition dans ma carrière, Pierre-Olivier Malaterre, Jean-Pierre Baume, Pierre-Yves Vion, Gilles Belaud et José Ribot-Bruno, à Pascal Kosuth et Marcel Kuper qui ont accompagné mes premiers pas dans la recherche, à mon directeur de thèse Didier Georges qui a contribué à ce que je passe cette HDR en automatique, à mes deux doctorantes Iana Guenova et Nadia Bedjaoui, et à mes deux collègues automaticiens et néanmoins amis Vincent Fromion et Gérard Scorletti.

Je garde une dédicace spéciale à mes trois chères têtes blondes, Louise, Octave et Gabi, deux petites et une grande, qui partagent ma vie au quotidien et qui contribuent à me garder les pieds sur terre, malgré mes velléités de planer dans les hautes sphères...

Table des matières

Avant-propos	1
Curriculum vitæ	3
1 Activités d’enseignement et d’encadrement	5
1.1 Activités d’enseignement	5
1.1.1 Enseignement à l’ENGREF	5
1.1.2 Enseignement à l’ENSEEIH	5
1.1.3 Autres expériences d’enseignement	6
1.2 Activités d’encadrement	6
1.2.1 Post-Doctorant	6
1.2.2 Thèses co-encadrées	6
1.2.3 Stages de DEA/DESS	7
1.2.4 Stages d’ingénieur	7
1.3 Animation scientifique	8
1.3.1 Gestion de projets de recherche	8
1.3.2 Collaborations	8
1.3.3 Insertion dans la communauté scientifique	9
1.4 Autres travaux	9
1.4.1 Expertise et évaluation	9
1.4.2 Relecture d’articles	9
1.4.3 Participation à des jurys de thèse	10
1.4.4 Divers	10
1.5 Liste de publications	10
1.5.1 Ouvrage coordonné	10
1.5.2 Chapitres d’ouvrage	10
1.5.3 Articles de revues scientifiques à comité de lecture	10
1.5.4 Articles de conférences à comité de lecture	11
1.5.5 Autres articles	12
1.5.6 Polycochés de cours	13
1.5.7 Rapports d’expertise	13
1.5.8 Autres documents	13
2 Synthèse des travaux de recherche	15
2.1 Introduction	15
2.2 Problématique de recherche	15
2.2.1 La gestion opérationnelle des systèmes d’irrigation à surface libre	15
2.2.2 L’intérêt d’un détour vers l’automatique fréquentielle	17
2.2.3 Le contenu de ce mémoire	18
2.3 Modélisation des canaux	18
2.3.1 Modélisation de l’écoulement dans un bief	19
2.3.2 Modélisation des ouvrages hydrauliques	26
2.3.3 Interaction bief-ouvrage	29
2.4 Contrôle des canaux	31
2.4.1 Structures de contrôle d’un canal	32

2.4.2	Contrôle d'un bief	34
2.4.3	Contrôle d'un canal	38
2.5	Supervision des canaux	46
2.6	Conclusions et perspectives	47
2.6.1	Conclusions	47
2.6.2	Perspectives	47
	Bibliographie	49
3	Sélection de publications	53

Avant-propos

François Lacroix, mon ancien chef de département au Cemagref, m'a un jour demandé sous forme de boutade : « Selon toi, quel est ton objet de recherche : les canaux d'irrigation, ou bien les équations de Saint-Venant ? » Je n'avais pas répondu à l'époque, puisque je me posais moi-même la question. Comme une HDR donne l'occasion d'examiner son objet de recherche, j'ai envie de répondre : « Les deux, mon capitaine ! », mais ce serait également une boutade.

En effet, si mon objet de recherche était les équations de Saint-Venant, alors je pourrais considérer le problème du garçon de café comme une application pertinente de ma recherche. Le problème du garçon de café est d'apporter un plateau rempli de verres pleins d'un liquide quelconque (qu'on supposera se comporter comme de l'eau) à des clients en terrasse (par exemple). On peut donc représenter ce problème comme celui du contrôle d'une surface libre régie par les équations de Saint-Venant, contenue dans un bac dont on contrôle la position et la vitesse de déplacement.

Il est tout à fait possible de considérer le contrôle des canaux comme un problème similaire à celui du garçon de café (voir par exemple les publications [dHPC⁺03, PWB05]). Ce n'est pas mon approche¹, puisque je cherche à résoudre des problèmes rencontrés par les gestionnaires, pour qui la priorité n'est pas le contrôle de la surface libre, mais bien la distribution de l'eau en fonction des demandes des usagers et des contraintes du système. Ce problème se pose aussi bien pour la gestion des canaux d'irrigation que pour la gestion des systèmes barrage-rivière, où la rivière est utilisée comme un canal naturel pour apporter l'eau aux utilisateurs (qui utilisent des pompes pour apporter l'eau au champ). Les deux problèmes de contrôle posés sont différents, puisqu'un gestionnaire de canal dispose de plusieurs moyens d'action (les vannes intermédiaires), alors qu'un gestionnaire de rivière ne peut actionner que la vanne du barrage amont.

Ma problématique de recherche concerne donc le développement d'outils issus de l'Automatique pour améliorer la gestion de l'eau dans les systèmes de transport d'eau à surface libre pour l'irrigation. Ces outils sont de différents types : modélisation, identification, analyse, contrôle et supervision. Mes contributions dans ces divers domaines seront présentées dans la synthèse de mes activités de recherche.

Ce mémoire est classiquement organisé en trois parties : un curriculum vitæ étendu, avec mes différentes activités d'enseignement, d'encadrement et d'animation scientifique, une synthèse de mes activités de recherche et une sélection de publications.

¹Rien n'empêche cependant d'aller du côté de la théorie du contrôle des équations de Saint-Venant pour y chercher des outils intéressants pour notre problème.

Xavier Litrico

né le 9 juin 1969 à Rouen
vie maritale, deux enfants

Cemagref, UMR G-EAU
361, rue JF Breton
34196 Montpellier cedex 5
Tél : 04 67 04 63 47
xavier.litrico@cemagref.fr

DIPLÔMES

1996–1999	Doctorat de l'ENGREF, Spécialité Sciences de l'Eau, mention très honorable avec les félicitations du jury.
1995	DEA National d'Hydrologie, mention bien.
1993–1995	École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
1990–1993	École Polytechnique

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

2003–2006	IGREF au Cemagref Montpellier, UMR G-EAU.
2000–2003	Chargé de Recherche au Cemagref Montpellier, UR Irrigation. Modélisation et commande automatique des systèmes hydrauliques à surface libre, canaux et rivières.
1999–2000	Post-doctorant à l'INRIA Sophia Antipolis, projet MIAOU. Modélisation et commande non linéaire de biefs de rivière.
1996–1999	Thèse de Doctorat à l'UR Irrigation du Cemagref Montpellier. « Modélisation, identification et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre ».
1995	Stage de DEA (6 mois) avec l'IIMI au Pakistan. Amélioration de la gestion manuelle d'un canal d'irrigation à l'aide d'un logiciel de simulation des écoulements.
été 1994	Stage au Bénin (2 mois 1/2) avec l'AFVP. Enquêtes sur la consommation en eau potable aux bornes fontaines publiques et privées dans les zones péri-urbaines (Djougou et Guéné).

ENSEIGNEMENT

2004–2007	Coordination de 2 modules d'enseignement de l'ENGREF, Voie d'Approfondissement « Eau » (50 h/an)
2003–2007	Enseignement d'une mineure de 2ème année « Contrôle des écoulements en canaux » à l'ENSEEIH (20 h/an)
1996–2004	Enseignement à l'ENGREF, Voie d'Approfondissement « Eau » (12 h/an)
1996–1999	TD de mathématiques appliquées en DEUG 2ème année à l'Université Montpellier II (60 h/an)
1992–1993	Colles de mathématiques au Lycée Saint-Louis, Paris (2 h/semaine)

ENCADREMENT

2001–2006	Co-encadrement de 2 thèses de Doctorat
2001–2006	Encadrement de 3 DEA/DESS
1997–2006	Encadrement de 10 stages d'ingénieur

PUBLICATIONS

17 publications dans des revues scientifiques à comité de lecture
1 ouvrage coordonné
2 chapitres d'ouvrage
27 articles de conférences à comité de lecture
5 autres articles

Chapitre 1

Activités d'enseignement, d'encadrement et d'animation scientifique

1.1 Activités d'enseignement

J'ai occupé différents postes d'enseignement : examinateur de colles de Mathématiques en classes préparatoires au Lycée Saint-Louis pendant mes études, moniteur à l'Université de Montpellier pendant ma thèse, et intervenant régulier à l'ENGREF (École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts) à Montpellier. J'enseigne actuellement en deuxième année de l'ENGREF à Montpellier et en deuxième année à l'ENSEEIH (École Nationale Supérieure d'Électronique, Électrotechnique, Informatique, Hydraulique et Télécommunications) à Toulouse.

1.1.1 Enseignement à l'ENGREF

Je coordonne depuis l'année 2005 deux modules d'enseignement en 2ème année de l'ENGREF, chacun d'une semaine environ, *Hydraulique à surface libre* (24 h) et *Eau et Agriculture* (27 h) :

- Le module d'Hydraulique à surface libre comporte un rappel des notions d'hydraulique à surface libre, un cours sur la démarche générale de modélisation hydraulique, un TD sur la discrétisation numérique d'un modèle mathématique, une séance de TP sur canaux expérimentaux, et un projet qui demande l'utilisation d'un modèle hydraulique : topographie, géométrie, simulations en permanent et transitoire pour répondre à un problème de conception et de gestion d'un canal d'irrigation.
- Le module Eau et agriculture comporte un rappel des chiffres et notions sur l'irrigation en France et dans le monde, un rappel sur la demande en eau des plantes, le bilan hydrique, puis l'analyse d'un périmètre irrigué selon différents aspects : drainage et salinisation, modernisation de la distribution de l'eau, aspects économiques et dimensionnement.

Je m'occupe également du suivi personnalisé d'un étudiant pendant son stage.

Entre 1996 et 2004, j'ai participé à l'enseignement en 1ère et 2ème année de l'ENGREF sur l'irrigation (6 h) [P1] et les outils de gestion pour les systèmes barrage-rivière (6 h) [P2].

1.1.2 Enseignement à l'ENSEEIH

Je participe depuis 2003 avec Pierre-Olivier Malaterre à l'enseignement d'une mineure de 2ème année de l'ENSEEIH : *Contrôle des écoulements en canaux* (20 h). Ce cours présente une approche complète depuis la problématique de gestion des canaux, la modélisation jusqu'à la commande, avec un aspect de mise en œuvre de la démarche sur un canal de laboratoire lors d'une séance de Travaux Pratiques de 4 heures. Lors de ce TP, les étudiants déterminent les coefficients du modèle hydraulique, valident le modèle par des simulations en boucle ouverte, puis l'utilisent pour concevoir des contrôleurs PI amont local et aval distant. Cette approche basée sur le modèle est comparée à une approche directe à partir de

la méthode ATV (cf. article [R17*]¹).

Ce cours a fait l'objet d'une publication dans un congrès [C22] et d'un polycopié [P3].

1.1.3 Autres expériences d'enseignement

- 2005 : Organisation d'une formation de 2 semaines à la modélisation et la gestion automatique des canaux pour le personnel du service aménagements hydrauliques de l'Office du Niger (Mali).
- 1997-1998 : Interventions ponctuelles à l'ESISAR (3 h), à l'ENSA Montpellier.
- 1996-1999 : Chargé de TD en mathématiques appliquées à l'Université Montpellier II DEUG 2^{ème} année (60 h/an).
- 1992-1993 : Examineur de colles de mathématiques au Lycée Saint-Louis, Paris (2 h/semaine).

1.2 Activités d'encadrement

1.2.1 Post-Doctorant

- Fayçal Ikhouane (chercheur invité de l'UPC), 2003, *Commande H_∞ d'un canal d'irrigation*, 2 mois.

1.2.2 Thèses co-encadrées

J'ai co-encadré deux thèses de doctorat en Automatique, dans le cadre du projet Gignac, financé par le plan Etat-Région Languedoc-Roussillon :

- Iana Guenova, 2001-2005, *Mise en œuvre d'une commande robuste pour un canal d'irrigation*, Thèse de l'INPG en Automatique. Co-encadrant avec Didier Georges (Directeur de thèse). Thèse soutenue le 31 mai 2005.

Publications : 2 articles de conférences [C17] et [C19].

Résumé : Cette thèse s'intéresse à la mise en œuvre de contrôleurs robustes pour les canaux d'irrigation, avec une partie modélisation et une partie commande. Pour la modélisation des canaux, on a linéarisé les équations de Saint-Venant pour en déduire un modèle simplifié qui permet de synthétiser des contrôleurs. Ce modèle est validé sur deux canaux expérimentaux, le canal de l'Université d'Évora au Portugal et le canal de Gignac en France, qui ont des dimensions et des caractéristiques physiques très différentes. On s'intéresse ensuite à la synthèse de contrôleurs robustes. La thèse a abouti à une méthodologie de contrôle robuste, depuis la modélisation jusqu'à la synthèse de contrôleurs décentralisés. Les structures de contrôle classiques sont analysées, et on montre que des contrôleurs simples de type PI décentralisés peuvent remplir le cahier des charges. On considère d'abord le problème de contrôle d'un seul bief, puis on étend les résultats au cas multi-biefs. Les structures de contrôle aval distant, amont local et mixte sont évaluées en termes de performance et robustesse, en simulation et de façon expérimentale. Les résultats obtenus confirment la pertinence de la méthodologie générique de modélisation et de contrôle.

- Nadia Bedjaoui, 2003-2006, *Supervision dynamique pour un canal d'irrigation*, Thèse de l'INPG en Automatique. Co-encadrant avec Damien Koenig (Directeur de thèse). Thèse soutenue le 6 décembre 2006.

Publications : 3 articles de conférences [C21], [C23], [C26] et 2 articles de revue en préparation.

Résumé : Cette thèse s'intéresse aux aspects liés à la détection de défauts et la réconciliation de données pour un canal d'irrigation. L'objectif principal des canaux d'irrigation est d'assurer une bonne distribution de l'eau aux usagers tout en préservant la ressource en eau. L'automatisation des ouvrages de régulation des canaux d'irrigation a largement contribué à l'amélioration de la gestion de l'eau. La commande automatique d'un canal consiste à agir sur l'ouverture et la fermeture des vannes suivant les données issues des différents instruments de mesures placés sur le canal. Le bon déroulement du processus de commande exige que ces mesures soient correctes. En pratique, ces mesures sont souvent entachées de bruits ou encore d'erreurs. Ces erreurs sont généralement l'effet de défauts dans les capteurs ou actionneurs. Il est par conséquent impératif de munir le canal d'un système de supervision permettant de détecter et de localiser ces défauts. Ce travail propose une méthodologie de détection et de localisation des défauts dans les canaux d'irrigation en utilisant des

¹Les articles notés avec une étoile sont reproduits à la fin de ce rapport, dans le chapitre 3 Sélection de publications

techniques de réconciliation de données et de diagnostic à base d'observateurs. La première partie est consacrée à l'application de la réconciliation de données sur un site réel du Canal de Gignac. Les canaux d'irrigation étant des systèmes à retards, la deuxième partie de ce travail porte sur l'extension des méthodes de diagnostic à base d'observateurs aux systèmes à retards.

J'encadre ou co-encadre deux autres thèses qui ont débuté fin 2006, l'une dans le cadre de la collaboration avec l'Université d'Évora au Portugal, l'autre qui se situe dans la continuité de ma thèse de doctorat :

- Carina Arranja, 2006–2009, *Conception et évaluation d'une méthodologie de commande pour les canaux d'irrigation : applications au canal expérimental d'Évora et au canal d'Alqueva*, Thèse de l'Université d'Évora (Portugal). Co-Directeur de thèse avec Manuel Rijo.
Publication : 1 article de revue [R12*].
- Simon Munier, 2006–2009, *Modélisation intégrée des écoulements dans un bassin versant pour l'identification de la dynamique des rivières et de la commande automatique des barrages*, Thèse de l'ENGRÉF en Sciences de l'Eau. Directeur de thèse, co-encadrement avec Gilles Belaud.

1.2.3 Stages de DEA/DESS

- Alexandre Lourosa, 2005, *Réconciliation de mesures pour un canal d'irrigation*, DESS analyse numérique, Université Paris Sud.
Publication : Article de conférence [C23].
- Florian Gasco, 2004, *Conception et évaluation d'un contrôleur PI non linéaire pour un canal d'irrigation*, DEA d'Automatique de l'INPG.
- Khalid Othman, 2002, *Modélisation d'une vanne à niveau amont constant*, DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université Montpellier II.
Publication : Article [A5].

1.2.4 Stages d'ingénieur

- Nicolas Marangé, 2006, *Modélisation hydraulique pour la gestion des barrages du fleuve Niger*, Master HYDROTECH, Université de Nice.
- Julien Heymes, 2006, *Modélisation intégrée d'un bassin versant pour la commande*, Master Pro 2 Mathématiques option STSC, Université de Metz.
- Florian Gasco, 2004, *Conception et évaluation d'un contrôleur PI flou pour un canal d'irrigation*, ESISAR, spécialité Automatique.
- Florence Doumesche, 2003, *Modélisation et régulation d'un canal d'irrigation, application au canal de Gignac*, INSA Rennes, Génie Mécanique et Automatique.
- Laurent Clavel, François Combes, Cédric Couffignal, Pascal De Guio, Mohamed Hamdaoui, François Marical, 2003, *Régulation d'un canal d'irrigation par la logique floue*, Projet scientifique collectif, Ecole Polytechnique.
- Mathieu Cavailhé, 2002, *Modélisation d'une vanne à niveau amont constant de type Begemann, étude expérimentale et modélisation*, INSA Lyon, spécialité Mécanique.
- Patrick de Bourayne, 2001, *Régulation des systèmes barrage-rivière : inventaire des barrages à vocation irrigation et soutien d'étiage et commande H_∞ des lâchures d'eau des barrages*, ENSEEIHT, spécialité hydraulique et mécanique des fluides.
- Véronique Roux, 2000, *Modélisation hydraulique et analyse de la gestion du canal de la Bourne*, INSA-Lyon, spécialité Mécanique.
- Eric Quirion, 2000, *Modélisation hydraulique du système principal du périmètre irrigué de la vallée de Hadéjia, Nigéria*, INSA Lyon, spécialité Mécanique.
- Cédric Coppens, 1997, *Identification non linéaire de la dynamique de biefs de rivières*, ENSEEIHT spécialité hydraulique et mécanique des fluides.

1.3 Animation scientifique

1.3.1 Gestion de projets de recherche

- 2006–2008 : Responsable régional (Languedoc-Roussillon) du projet transfrontalier de la Communauté de Travail des Pyrénées GEPREDO intitulé *Gestion prédictive de la ressource en eau, application au cas des bassins pyrénéens*.
- 2006 : Coordinateur du projet UMR G-EAU « Modélisation hydraulique pour la gestion de l'eau ».
- 2005–2006 : Responsable du Programme d'Action Intégrée PESSOA No. 09685 UE avec l'université d'Évora (Portugal) intitulé *Validation expérimentale de méthodes de régulation automatiques sur le canal réduit de l'Université d'Évora*.
- 2003–2005 : Responsable régional (Languedoc-Roussillon) du projet transfrontalier de la Communauté de Travail des Pyrénées GERHYCO II intitulé *Gestion, simulation et prédiction des ressources en eau en périodes critiques (alerte de crue - sécheresse extrême)*. Organisation d'une session spéciale sur la modélisation et le contrôle des canaux à la conférence CDC/ECC'05.
- 2001–2003 : Responsable du projet de coopération scientifique et technique avec l'université d'Évora (Portugal) No. 547-B4 intitulé *Modélisation hydraulique et tests de régulateurs automatiques pour le canal réduit d'Évora*. Première mise en œuvre d'un contrôleur H_∞ sur un canal réel. Publications : 2 articles de revue [R12*], [R13*] et 2 articles de congrès [C15] et [C16].
- 2000–2003 : Action Scientifique Structurante AQUAE (INRA-Cemagref) sur la gestion de systèmes à retard. 3 articles de revues [R8*, R9*, R10] et 7 articles de congrès [C15] et [C8–C13].
- 2000–2003 : Programme Commun Systèmes Irrigués : étude hydraulique d'un canal d'irrigation au Nigeria (avec le CIRAD). Conception d'un modèle réduit d'une vanne hydro-mécanique (avec Gilles Belaud de l'ENSAM) : 1 article de revue [R11*].
- 1996–1999 : Responsable de la collaboration avec la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne sur l'amélioration des algorithmes de régulation en temps réel des rivières. 1 prototype pour l'identification et la régulation automatique des rivières. 7 articles de revue [R1–R7], 5 articles de congrès [C2–C6] et un poster [A3].

1.3.2 Collaborations

Mes principaux collaborateurs sont mes collègues du Thème de Recherche TRANSCAN du Cemagref, Jean-Pierre Baume, Gilles Belaud, Pierre-Olivier Malaterre, José Ribot-Bruno et Pierre-Yves Vion, avec qui je partage plus qu'un couloir commun entre nos bureaux respectifs. Les projets de recherche étant gérés collectivement au sein de chaque Thème de Recherche au Cemagref, j'ai donc bénéficié pour ma recherche de projets montés par mes collègues : le projet de station expérimentale du canal de Gignac en particulier, financé par le plan Etat-Région, a permis de financer les deux thèses que j'ai co-encadrées. Qu'en soit ici remercié le principal artisan du montage financier et de la gestion de ce projet, Pierre-Yves Vion. Les enseignements à l'ENGREF sont également effectués collectivement par l'ensemble des personnels du Thème de Recherche.

Hors du Cemagref, j'ai des collaborations à la fois avec des chercheurs en automatique et en hydraulique, avec des gestionnaires de canaux et avec des enseignants. En Automatique mes collaborations principales sont avec :

- Didier Georges, professeur à l'INPG : collaboration depuis le début de ma thèse fin 1995, en tant que directeur de thèse (voir publications [R1], [R2], [R6], [C2–C6]). Nous avons co-dirigé l'ouvrage collectif [O1], et co-encadré la thèse de Iana Guenova (voir thèses co-encadrées).
- Vincent Fromion, chargé de recherche à l'INRA : collaboration majeure depuis mon intégration au Cemagref en 2000, qui a abouti à plus de vingt publications, dont une dizaine dans des revues à comité de lecture (voir [R8*–R10] et [R12*–R16*]). Cette collaboration devrait aboutir à un ouvrage de synthèse sur la modélisation et la commande des canaux, dont la rédaction est en cours.
- Damien Koenig, maître de conférences à l'ESISAR : co-directeur de la thèse de Nadia Bedjaoui (voir les publications [C21] et [C26]).
- Jean-Baptiste Pomet, chargé de recherche à l'INRIA : collaboration durant mon post-doctorat à l'INRIA Sophia-Antipolis en 1999-2000 sur la modélisation et la commande non-linéaire d'un bief de rivière (communication [C14]).
- Jacques Sau, professeur à l'Université de Lyon : collaboration depuis ma thèse, qui ne s'est pas traduite par des publications, mais par de nombreux échanges toujours stimulants.

En Hydraulique :

- Marcel Kuper, chercheur au CIRAD : j’ai collaboré avec Marcel Kuper lors de mon stage de DEA, qu’il a encadré au Pakistan, sur la simulation de la gestion manuelle d’un canal d’irrigation (communications [C1] et [A2]).
- Manuel Rijo, professeur à l’Université d’Évora, Portugal : cette collaboration s’est effectuée dans le cadre de plusieurs projets bilatéraux financés par l’ambassade France au Portugal et le GRICES (Portugal) sur la modélisation et la commande du canal expérimental de l’Université d’Evora, dont le soutien a été renouvelé trois fois depuis 2001 (publication [R12*] et communications [C16] et [C19]). Co-encadrement de la thèse de Carina Arranja.
- Gilles Belaud, maître de conférences à Sup’Agro Montpellier : modélisation des vannes Bege-mann/Vlugter (voir les publications [R11*] et [R19]), co-encadrement de la thèse de Simon Munier, projet ALGEQUEAU.

Du côté des gestionnaires de canaux, j’ai travaillé avec la CACG (Compagnie d’Aménagement des Coteaux de Gascogne) pendant ma thèse et dans le cadre des projets GERHYCO I et GERHYCO II (avec l’ENI de Tarbes, et des partenaires espagnols dont l’UPC de Barcelone) sur la modélisation, l’identification et la commande robuste de systèmes barrage-rivière. Enfin, une collaboration est en cours avec Vincent Kulesza, directeur de l’ASA du canal de Gignac dans le cadre du GIS Gignac sur la régulation des canaux.

Pour les aspects enseignements, je collabore avec les enseignants de l’ENSEEIH (en particulier Gilles Harran, Alain Sevrain et Jean-Félix Alquier) dans le cadre de l’enseignement de la mineure de deuxième année de la spécialisation hydraulique, en particulier sur les aspects liés au montage du TP sur le canal expérimental de l’ENSEEIH (voir communication [C22]).

Je collabore également avec les membres de l’UMR G-EAU, en particulier Katrin Erdlenbruch du Cemagref pour l’organisation du séminaire MATHEO (voir ci-dessous).

1.3.3 Insertion dans la communauté scientifique

- 2005 – présent : Animateur scientifique de l’axe 2 de l’UMR G-EAU.
- 2006 – présent : Co-organisation avec Katrin Erdlenbruch d’un séminaire scientifique périodique MATHEO « Outils mathématiques pour la gestion de l’eau » au sein de l’UMR G-EAU.
- 2005 : Organisateur et président de séance de la session spéciale “Recent Progress in Modelling and Control of Open-Channel Irrigation Canals” à la 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2005, Séville.
- 2003 : Président de séance de la session “Modelling II” de European Control Conference, Cambridge.
- 2001–2002 : Co-organisation de séminaires scientifiques internes au Cemagref Montpellier.

1.4 Autres travaux

1.4.1 Expertise et évaluation

- 2006 : Consultant pour un projet de recherche portugais FLOW.
- 2003 : Évaluation scientifique d’un projet portugais pour le 5^e PCRD.
- 2000–2001 : Deux missions au Nigeria dans le cadre du Programme Commun Systèmes Irrigués (Cirad-IRD-Cemagref) : diagnostic et modélisation hydraulique d’un canal d’irrigation (2 × 15 jours).
- 1998–2003 : Etudes pour la DERF (Direction de l’Espace Rural et de la Forêt du Ministère de l’Agriculture) sur la gestion des systèmes barrage-rivière dans le Sud de la France : inventaire des barrages, évaluation de l’efficacité, propositions d’amélioration de la gestion.

1.4.2 Relecture d’articles

J’ai des activités de relecture d’articles pour plusieurs revues et conférences :

- Revues de rang A : *Applied Mathematical Modelling* (1998–2005), *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (2002–2006), *Control Engineering Practice* (2004 et “designated editor” pour un article en 2005), *IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2 articles en 2006), *la Houille blanche* (2004), *Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series B* (2004), *Control and*

Intelligent Systems (2004), *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* (2005), *Journal of Hydraulic Engineering* (2006), *Journal of Hydrologic Engineering* (2006).

- Conférences internationales : *Conference on Decision and Control* (2002–2006), *American Control Conference* (2003–2006), *Conference on Control Applications* (2006), *Portuguese Conference on Automatic Control* (2006), *European Control Conference* (2005–2007).

1.4.3 Participation à des jurys de thèse

- Jean-François Dulhoste (novembre 2001), thèse de l'INPG en Automatique : Contribution à la commande non linéaire de systèmes d'irrigation.
- Iana Guenova-Welz (mai 2005), thèse de l'INPG en Automatique : voir thèses co-encadrées.
- David Crévoisier (décembre 2005), thèse de l'ENGREF en Sciences de l'Eau : Modélisation analytique des transferts bi et tridirectionnels eau-soluté. Application à l'irrigation à la raie et à la micro-irrigation.
- Nadia Bedjaoui (décembre 2006), thèse de l'INPG en Automatique : voir thèses co-encadrées.

1.4.4 Divers

- 2005 : Présentation au Conseil Général du GREF des avancées du Thème de Recherche TRANSCAN (Modélisation et régulation du transport de l'eau en canaux et rivières).
- 2000–2003 : Participation à plusieurs groupes de travail du GdR Automatique du CNRS (systèmes à retard, interaction fluides-structures, commande de systèmes de dimension infinie, analyse des systèmes non linéaires).
- 2000 : Présentation au Conseil Scientifique et Technique du Cemagref des avancées du Thème de Recherche TRANSCAN (Modélisation et régulation du transport de l'eau en canaux et rivières).
- 2000–2001 : Participation à la fête de la Science (poster et présentation à une classe de 1^{ère} S).

1.5 Liste de publications

1.5.1 Ouvrage coordonné

- [O1] D. Georges, X. Litrico, 2002, *Automatique pour la gestion des ressources en eau*, Hermès science publications, coordonnateurs, 288 pages.

1.5.2 Chapitres d'ouvrage

- [Ch1] X. Litrico, J.-P. Baume, P.-O. Malaterre, D. Georges, L. Lefèvre, J.-F. Dulhoste, G. Besançon, 2002, Modélisation des systèmes hydrauliques à surface libre, in *Automatique pour la gestion des ressources en eau*, Hermès sciences publications, pp.45-118.
- [Ch2] X. Litrico, P.-O. Malaterre, D. Georges, L. Lefèvre, J.-F. Dulhoste, G. Besançon, V. Fromion, P. Pognant-Gros, 2002, Commande en dimension finie, in *Automatique pour la gestion des ressources en eau*, Hermès sciences publications, pp.121-182.

1.5.3 Articles de revues scientifiques à comité de lecture

- [R17*] X. Litrico, P.-O. Malaterre, J.-P. Baume, P.-Y. Vion, J. Ribot-Bruno, 2007, Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 133, No. 1, pp. 27-37.
- [R16*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, Boundary control of linearized Saint-Venant equations oscillating modes, *Automatica*, Vol. 42, Issue 6, pp. 967-972.
- [R15*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool : (I) Theory, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 4, pp. 359-368.
- [R14*] X. Litrico, V. Fromion, J.P. Baume, 2006, Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool : (II) Implementation issues, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 4, pp. 369-379.

- [R13*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, H_∞ control of an irrigation canal pool with a mixed control politics, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 14/1, pp. 99-111.
- [R12*] X. Litrico, V. Fromion, J.-P. Baume, C. Arranja, M. Rijo, 2005, Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations, *Control Engineering Practice*, Vol. 13, No. 11, pp. 1425-1437.
- [R11*] X. Litrico, G. Belaud, J.-P. Baume, J. Ribot-Bruno, 2005, Hydraulic modelling of an automatic upstream water level control gate, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 176-189. **ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering Best Paper Award 2005.**
- [R10] X. Litrico, V. Fromion, 2004, Simplified modelling of irrigation canals for controller design, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 130, No. 5, pp. 373-383.
- [R9*] X. Litrico, V. Fromion, 2004, Analytical approximation of open-channel flow for controller design, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 28, No. 7, pp. 677-695.
- [R8*] X. Litrico, V. Fromion, 2004, Frequency modeling of open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, pp. 806-815.
- [R7] X. Litrico, 2002, Robust IMC flow control of SIMO open-channel dam-river systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 432-437.
- [R6] X. Litrico, D. Georges, 2001, Robust LQG control of single input multiple outputs dam-river systems, *International Journal of Systems Science*, Vol. 32, No. 6, pp. 795-805.
- [R5] X. Litrico, 2001, Nonlinear diffusive wave modeling and identification for open-channel river reaches, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 4, pp. 313-320.
- [R4] X. Litrico, 2001, Robust flow control of single input multiple outputs regulated rivers, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 281-286.
- [R3] X. Litrico, 2001, Modélisation et commande robuste de systèmes barrage-rivière, *la Houille Blanche*, n° 3/4, pp. 86-90.
- [R2] X. Litrico, D. Georges, 1999, Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system : (I) Modelling, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 23, No. 11, pp. 809-827.
- [R1] X. Litrico, D. Georges, 1999, Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system : (II) Controller design, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 23, No. 11, pp. 829-846.

1.5.4 Articles de conférences à comité de lecture

- [C27] M. Thomassin, D. Georges, G. Besançon, X. Litrico, 2006, Modélisation et identification d'un bief d'irrigation par une méthode de collocation, *Journées Identification et Modélisation Expérimentale JIME'2006*, Poitiers.
- [C26] N. Bedjaoui, X. Litrico, D. Koenig, P.-O. Malaterre, 2006, Robust H_∞ observers design for time-delay systems : Application to an open-channel, *45th Conference on Decision and Control*, San Diego.
- [C25] X. Litrico, V. Fromion, G. Scorletti, 2006, Robust feedforward boundary control of hyperbolic conservation laws, *45th Conference on Decision and Control*, San Diego.
- [C24*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, Boundary control of hyperbolic conservation laws with a frequency domain approach, *45th Conference on Decision and Control*, San Diego.
- [C23] N. Bedjaoui, X. Litrico, A. Lourosa, J. Ribot-Bruno, 2006, Data reconciliation for an irrigation canal, *7th International Conference on Hydroinformatics*, Nice, Vol. II, pp. 1503-1510.
- [C22] X. Litrico, P.-O. Malaterre, G. Harran, J.-F. Alquier, 2006, Hands on teaching for real-time control of open-channels, *7th International Conference on Hydroinformatics*, Nice, Vol. IV, pp. 3093-3100.
- [C21] D. Koenig, N. Bedjaoui, X. Litrico, 2005, Unknown input observers design for time-delay systems : Application to an open-channel, *44th Conference on Decision and Control*, Seville, pp. 5794-5799.
- [C20] X. Litrico, V. Fromion, 2005, Design of structured multivariable controllers for irrigation canals, *44th Conference on Decision and Control*, Seville, pp. 1881-1886.

- [C19] I. Guenova-Welz, X. Litrico, V. Fromion, M. Rijo, P.-O. Malaterre, 2005, Stability and performance analysis of classical decentralized control of irrigation canals, *16th IFAC World Congress*, Prague, Tchécoslovaquie.
- [C18] X. Litrico, V. Fromion, 2004, Boundary control of linearized Saint-Venant equations oscillating modes, *4^{3rd} Conference on Decision and Control*, Bahamas.
- [C17] I. Guenova, X. Litrico, D. Georges, 2004, Modelling and robust PID control of a real irrigation canal, *IASTED Conference on Modelling, Identification and Control*, MIC 2004, Grindelwald, Switzerland.
- [C16] X. Litrico, V. Fromion, J.-P. Baume, M. Rijo, 2003, Modelling and PI controller design for an irrigation canal, *European Control Conference*, Cambridge, UK.
- [C15] X. Litrico, V. Fromion, 2003, Advanced control politics and optimal performance for an irrigation canal, *European Control Conference*, Cambridge, UK.
- [C14] X. Litrico, J.-B. Pomet, 2003, Nonlinear modelling and control of a long river stretch, *European Control Conference*, Cambridge, UK.
- [C13] X. Litrico, V. Fromion, 2003, Variations autour de la performance optimale de systèmes hydrauliques à surface libre, *Colloque Auto-Agro*, INRA Montpellier, France, pages 197-207.
- [C12] X. Litrico, V. Fromion, 2002, Infinite dimensional modeling of open-channel hydraulic systems for control purposes, *41st Conference on Decision and Control*, Las Vegas, pp. 1681-1686.
- [C11] X. Litrico, V. Fromion, 2002, Real-time management of multi-reservoir hydraulic systems using H_∞ optimization, *15th IFAC World Congress*, Barcelone, Espagne.
- [C10] X. Litrico, V. Fromion, G. Scorletti, 2001, Improved performance of open-channel hydraulic systems using intermediate measurements, *3rd IFAC Workshop on Time Delay Systems*, Santa Fe, USA.
- [C9] X. Litrico, V. Fromion, 2001, About optimal performance and approximation of open-channel hydraulic systems, *40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, USA.
- [C8] X. Litrico, V. Fromion, 2001, A propos de la performance optimale et de l'approximation de systèmes hydrauliques à surface libre, *Journées Automatique et Environnement*, Saint-Etienne, 4-6 juillet 2001.
- [C7] X. Litrico, V. Fromion, J.-P. Baume, P.-O. Malaterre, 2000, Modélisation et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre : application aux rivières et canaux d'irrigation, *Journées Automatique et Environnement*, Nancy, mars 2000.
- [C6] X. Litrico, D. Georges, 1999, Robust optimal control of a dam-river system with intermediate measurements, *European Control Conference*, ECC'99, Karlsruhe, Germany.
- [C5] X. Litrico, D. Georges, J.-L. Trouvat, 1998, Modelling and robust control of a dam-river system, *International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, SMC'98, San Diego, USA, pp. 3862-3867.
- [C4] X. Litrico, P.-O. Malaterre, D. Georges, J.-L. Trouvat, 1998, Commande optimale d'un système barrage-rivière avec points de mesure intermédiaires, *Colloque SHF, 25^{èmes} Journées de l'Hydraulique*, Chambéry, France.
- [C3] X. Litrico, D. Georges, 1997, Nonlinear identification of an irrigation system, *36th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, USA, p. 852-857.
- [C2] X. Litrico, D. Georges, 1997, Nonlinear identification of an irrigation system with withdrawals, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals*, RIC'97, Marrakech, Maroc, p. 58-67.
- [C1] M. Kuper, X. Litrico, Z. Habib, 1997, Analyzing the impact of alternative operational rules on water distribution, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals*, RIC'97, Marrakech, Maroc, p. 171-181.

1.5.5 Autres articles

- [A5] S.Z. Abubakar, M.K. Othman, X. Litrico, 2003, Hydraulic performance of Hadejia Valley Irrigation Project Main Canal and its effect on operation and maintenance activities, in *Promotion of participatory irrigation management in Hadejia Valley Irrigation project, Nigeria*, S.Z. Abubakar, M. Kuper, eds.

- [A4] X. Litrico, 2000, Comparison of different nonlinear models for flow transfer in rivers, Août 2000, Working Paper Cemagref UR IRMO No. 2000-10, 21 p.
- [A3] X. Litrico, P.-O. Malaterre, D. Georges et J.-L. Trouvat, 1998, Commande optimale d'un système barrage-rivière avec points de mesure intermédiaires, *poster présenté au concours organisé par la CODOR (Conférence des Directeurs d'Organismes de Recherche)*, Montpellier, France.
- [A2] M. Kuper, Z. Habib, X. Litrico, P.-O. Malaterre, 1998, Improved operational scenarios for regulation and canal water distribution, *IIMI Lahore ed., Cemagref Montpellier ed., the collaboration between IIMI and Cemagref in Pakistan*, Lahore, Pakistan, octobre, 1997, p. 7-25.
- [A1] X. Litrico, 1994, L'eau pour tous en ville? La revente de voisinage dans un centre secondaire du Bénin, in *La gestion du service de l'eau dans les centres secondaires du bassin du fleuve Sénégal*, D. Allély et B. Collignon, eds, coll. Etudes et Travaux, Editions du Gret, Ministère de la coopération, p. 107-112.

1.5.6 Polycopiés de cours

- [P3] X. Litrico, P.-O. Malaterre, 2006, Contrôle des écoulements en canaux, Cours de l'ENSEEIH, 142 p.
- [P2] X. Litrico, 2002, Modélisation et régulation automatique des systèmes barrage-rivière utilisés pour l'irrigation, Cours de l'ENGREF, 57 p.
- [P1] J.P. Baume, X. Litrico, P.-O. Malaterre, P.-Y. Vion, 2000, Modernisation et automatisation des canaux d'irrigation. Série Irrigation « R&E » 2000-08.

1.5.7 Rapports d'expertise

- [M2] X. Litrico, 2001, Hydraulic study of Begemann gates and CHO turnouts in the Hadejia Valley Irrigation Project North Main Canal, Nigeria, rapport de mission PCSI, mars-avril 2001.
- [M1] X. Litrico, 2000, Hydraulic study of the Hadejia Valley Irrigation Project North Main Canal, Nigeria, rapport de mission PCSI, 40 p.

1.5.8 Autres documents

- [T3] X. Litrico, 1999, Modélisation, identification et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre, thèse de l'ENGREF en Sciences de l'Eau.
- [T2] X. Litrico, 1995, Alternative scenarios for improved operations at the main canal level : a study of Fordwah Branch, Chishtian Subdivision using a mathematical flow simulation model, DEA National d'Hydrologie USTL Montpellier, Cemagref-ENGREF, 144 p. + annexes.
- [T1] X. Litrico, 1994, Etude économique et institutionnelle de la vente de l'eau dans deux centres secondaires du Bénin, rapport de stage ENGREF-AFVP.

Chapitre 2

Synthèse des travaux de recherche : Approches fréquentielles pour la modélisation et la commande des systèmes hydrauliques à surface libre

2.1 Introduction

La philosophie générale développée dans ce mémoire¹ est la suivante : on cherche à utiliser à la fois les modèles physiques développés et validés par les hydrauliciens et les techniques fréquentielles développées et validées par les automaticiens. L'enjeu est donc de trouver une voie à mi-chemin des deux domaines. Les publications qui sont issues de ce travail sont donc également à mi-chemin entre les deux disciplines. Cela implique une rédaction différente lorsqu'on s'adresse à des automaticiens ou à des hydrauliciens, puisque les pré-requis ne sont pas les mêmes dans chaque discipline. Là est tout le sel et l'intérêt d'une approche interdisciplinaire. Il est tout à fait possible pour un automaticien de concevoir le problème de contrôle des canaux comme une pure application de techniques développées par ailleurs. Dans ce cas, chaque canal pose des problèmes spécifiques qu'il faut résoudre comme pour toute application. Un modèle à base physique n'est alors pas nécessaire, puisqu'il suffit d'identifier le modèle à partir des données (voir dans le cas des canaux [Wey01]). Enfin, n'importe quelle méthode de synthèse de contrôleurs peut s'appliquer.

J'essaierai de montrer dans ce document qu'il est plus intéressant de partir de la connaissance physique du système. Les ingénieurs hydrauliciens utilisent pour la conception et la simulation des canaux les équations de Saint-Venant [BdSV71] couplées aux équations d'ouvrages. L'avantage de ce modèle est qu'il a été largement validé et qu'il est générique, puisqu'il traduit la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Il permet donc d'envisager des solutions pour un grand nombre de canaux et pas uniquement pour un canal déterminé. De plus, en suivant cette voie, on peut découvrir *en chemin* des pistes inexplorées, voire des résultats originaux. Dans notre cas, l'étude de l'équation de Saint-Venant nous a mené vers le problème plus général du contrôle frontière des équations hyperboliques de lois de conservation.

2.2 Problématique de recherche

2.2.1 La gestion opérationnelle des systèmes d'irrigation à surface libre

On estime à 80 % la part de la consommation d'eau douce mondiale due à l'irrigation et à 30 % la part effectivement délivrée au champ. L'efficacité des systèmes irrigués est donc très faible, pour différentes raisons liées en partie au mode de gestion des canaux [PBW94]. De plus, le service aux utilisateurs (les agriculteurs irrigants) n'est pas optimal² et réserve de grandes marges de progrès. Ces

¹Qui correspond bien évidemment à la façon dont j'ai orienté ma recherche.

²En particulier lorsque les canaux sont gérés manuellement, ce qui représente la grande majorité des cas.

systèmes sont donc à la fois peu performants vis-à-vis de l'utilisation de la ressource naturelle³ et peu performants vis-à-vis des usagers⁴. C'est pourquoi de nombreuses recherches ont été effectuées pour chercher à moderniser la gestion de ces systèmes irrigués. L'application de l'Automatique pour la gestion des canaux principaux est une voie qui a montré des potentialités fortes. Le Canal de Provence utilise sa méthode de « régulation dynamique » comme une vitrine internationale depuis les années 1970 [RCB87]. La Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne a également développé une expertise dans la gestion automatique de systèmes barrage-rivière utilisés pour l'irrigation [HK93].

Face au constat général d'une faible efficacité de la gestion de l'eau par les périmètres irrigués et aux exemples de modernisation réussie, la gestion automatique des canaux a développé un intérêt croissant chez les chercheurs, comme en témoigne le nombre de publications dans le domaine depuis les années 1990. Ceci répondait aussi à un besoin des ingénieurs en bureau d'études, pour avoir des méthodes et des outils permettant d'analyser et de proposer des solutions techniques au problème de contrôle en temps réel des canaux d'irrigation.

Les travaux de recherche se sont intensifiés au début des années 1990, avec la création de groupes de travail de l'ASCE (American Society of Civil Engineers) sur la modélisation [ASC93] et le contrôle des canaux [ASC98]. C'est ce qui explique que le Journal of Irrigation and Drainage Engineering de l'ASCE soit celui privilégié pour la diffusion des résultats de recherche dans ce domaine à l'attention des hydrauliciens.

Un des résultats intéressants obtenus par le groupe de travail sur la régulation des canaux est celui sur la classification des algorithmes de régulation automatique des canaux d'irrigation [MRS98]. Cet article basé sur la thèse [Mal94] propose une classification rigoureuse des méthodes de régulation, qui donne une vision plus claire de l'état de l'art sur le sujet.

Ce groupe de travail a également proposé des cas tests pour la régulation des canaux, inspirés de canaux réels [CKGS98]. Plusieurs méthodes de régulation automatique ont été testées sur ces cas-tests (prédicteur de Smith [DS98], inversion de modèle [LFM⁺98], commande LQG [Mal98], contrôleurs PI [CW04], conception d'une boucle ouverte [BC99]), et ont été comparées à l'aide d'indicateurs de performance [CKGS98]. Enfin, de nombreuses méthodes ont été testées en simulation sur d'autres canaux : voir les travaux présentés aux colloques [RIC97], [SMC98], [ECC99].

Cependant, si ces travaux ont permis des avancées significatives, bien des points restaient obscurs à la fin des années 1990. Mes travaux ont contribué à clarifier les points suivants :

- En modélisation :

1. Comment caractériser le comportement dynamique d'un canal ? De façon surprenante, le comportement d'un canal en régime non uniforme n'a pas été étudié de manière approfondie, alors que c'est justement le type d'écoulement le plus répandu dans la réalité. A travers une méthode originale de calcul de la réponse fréquentielle, nous avons analysé en détail les propriétés de l'écoulement autour d'un régime non-uniforme, en termes de retard, intégrateur et modes oscillants.
2. Quel est l'effet des ouvrages sur la dynamique des écoulements ? Il était par exemple connu des hydrauliciens qu'un seuil en « bec de canard »⁵ permet d'accélérer l'écoulement, mais ici encore, l'étude était basée sur des simulations temporelles, sans valeur générique. L'analyse fréquentielle nous a permis de comprendre l'impact des ouvrages sur la dynamique de l'équation de Saint-Venant.
3. Quel(s) modèle(s) utiliser pour la synthèse de contrôleurs ? Nous avons proposé un modèle simplifié qui permet de concevoir des contrôleurs de type PI à partir de marges de gain et de phase désirées, ainsi que des modèles rationnels calculés à partir des pôles et de la réponse fréquentielle de l'équation de Saint-Venant. Nous avons également validé sur plusieurs canaux le modèle de Saint-Venant sur une large gamme de fréquences, montrant l'intérêt de ce modèle pour la conception de contrôleurs. De plus, comme les modèles simplifiés proposés sont calculables directement à partir des paramètres physiques (géométrie, frottement, etc.), ceci ouvre la voie vers la prise en compte de la gestion automatique dans le dimensionnement des canaux.

³Ce qui a un impact fort sur l'environnement et commence à être fortement contraint en particulier dans les pays occidentaux (voir l'application de la Directive Cadre sur l'eau pour les pays membres de la Communauté Européenne).

⁴Ce qui a un impact fort sur les productions agricoles issues des cultures irriguées.

⁵Un bec de canard est un seuil de largeur supérieure à celle de l'écoulement. Il forme une sorte de pointe qui ressemble à un bec de canard.

- En contrôle :
 1. Comment traduire le problème de gestion du canal en un cahier des charges pour la conception de contrôleurs? Nous avons traduit le problème de gestion d'un canal en termes à la fois compréhensibles pour les automaticiens et les hydrauliciens, en l'exprimant sous la forme d'un compromis entre service à l'utilisateur et consommation d'eau et proposé un schéma de contrôle multivariable mixte qui permet de mettre en œuvre ce compromis.
 2. Quelle est la performance maximale qu'on peut obtenir sur un canal ou une rivière donnés? Nous avons montré que cette performance maximale est liée au retard intrinsèque de l'équation de Saint-Venant et que dans le cas d'une structure spécifique de contrôle (PI aval distant, voir plus loin), la performance en termes de rejet de perturbation de débit est directement liée au retard du bief, à sa capacité de stockage et à la marge de gain du contrôleur PI utilisé.
 3. Comment caler de façon systématique des contrôleurs pour les canaux? Nous avons proposé une méthode de calage automatique qui utilise les modèles simplifiés décrits plus haut ainsi que la méthode de conception de contrôleurs PI robustes.

Mes contributions concernent chacun de ces points, en cherchant à développer des réponses les plus génériques possible (sans prétendre pour autant clore le sujet) et avec une attention particulière à la mise en œuvre pratique des méthodes développées.

La philosophie sous-jacente à ce travail est qu'il ne faut pas se priver d'une approche pragmatique lorsqu'elle donne de bons résultats, mais qu'il est souvent judicieux et productif de se pencher de manière approfondie sur les problèmes posés, pour en tirer des résultats génériques, dont la portée est plus grande que la simple approche pragmatique. Le plus satisfaisant est lorsque les deux méthodes se rejoignent et qu'on arrive par une approche générique à des outils utilisables par les gestionnaires, à la manière des méthodes pragmatiques qu'ils utilisent quotidiennement.

L'approche que j'ai choisie est une approche fréquentielle, pour utiliser les outils issus de l'automatique des systèmes linéaires, qui ont montré leur puissance dans bien des applications. Cette approche linéaire est un pré-requis avant de chercher à développer des méthodes prenant en compte le caractère non linéaire du système. De par sa conception même, un canal est le plus souvent géré autour d'un point de fonctionnement et nos résultats ont montré qu'une approche purement linéaire restait très efficace même loin du point d'équilibre.

Une telle approche nécessite une validation, par la simulation ou par l'expérience. C'est pourquoi les méthodes proposées ont été presque systématiquement validées sur des canaux réels de différentes dimensions, depuis le canal laboratoire de l'ENSEEIH (12 mètres de long pour un débit max de 20 l/s), le canal de l'ENSAM (15 mètres de long et débit max 60 l/s), le canal pilote de l'Université d'Évora (150 mètres de long, débit max 90 l/s), jusqu'au canal de Gignac (25 km de long et débit max 2,5 m³/s). Lors de ces expériences, l'approche linéaire s'est montrée largement plus effective que ne le prédisait la théorie.

2.2.2 L'intérêt d'un détour vers l'automatique fréquentielle

Examinons maintenant le problème du point de vue des automaticiens. Les automaticiens se sont intéressés à la commande des canaux comme une application avec de nombreux défis à relever : ce sont des systèmes distribués, sujets à de fortes perturbations, présentant des non linéarités (écoulement et ouvrages) et des retards. Comme le problème de la gestion de l'eau est également un sujet d'importance croissante, ils ont vu là une opportunité de montrer leur savoir-faire pour le contrôle en temps réel d'un système dynamique.

La demande sociétale est également forte pour une modernisation de la gestion des canaux d'irrigation, qui sont très consommateurs en eau. L'argumentation était donc toute trouvée : l'Automatique va pouvoir apporter des solutions à une meilleure gestion de ces canaux.

En pratique, cette démarche s'est traduite par de nombreuses publications mais peu d'applications. Dans les publications d'automatique, le problème de gestion en temps réel des canaux était vite évacué, pour laisser place à la formulation mathématique et aux résultats des dernières méthodes développées par les automaticiens sur cette application. Alors que la traduction du problème de gestion lui-même sous la forme d'un cahier des charges pour l'automaticien était un problème non résolu.

Ma démarche a donc été d'étudier en détail les linéarisations du modèle physique classique pour les écoulements (matrice de transfert des équations de Saint-Venant pour des écoulements non uniformes), de proposer des modèles approchés qui soient utilisables facilement par les hydrauliciens, d'examiner

les structures classiques de contrôle d'un canal et de proposer une méthode permettant au gestionnaire d'effectuer un compromis entre la gestion de la ressource (élément essentiel si l'on veut faire des économies d'eau) et la performance du service vis-à-vis des usagers (point également essentiel pour le gestionnaire).

2.2.3 Le contenu de ce mémoire

Cette synthèse ne reprend pas mon travail de thèse qui concernait la modélisation, l'identification et le contrôle robuste des systèmes barrage-rivières, ni les suites de ce travail (modélisation et commande non linéaire, effectués lors de mon post-doc à l'INRIA Sophia Antipolis). Il est donc centré sur mes travaux effectués après mon intégration au Cemagref en mars 2000 en tant que chargé de recherche.

Ce rapport est séparé en trois parties :

- une première partie sur la modélisation, avec la modélisation des écoulements, celle des ouvrages hydrauliques et l'analyse de leur interaction ;
- une deuxième partie sur le contrôle, avec l'étude de la structure de contrôle, le contrôle d'un bief, puis d'un canal ;
- la troisième partie examine le problème de supervision d'un canal, pour la détection de pannes et la réconciliation de données ;
- enfin, la conclusion présente un certain nombre de pistes de recherche pour l'avenir.

Chaque partie sera abordée d'un point de vue pratique (le point de vue de l'ingénieur qui cherche une solution à un problème de gestion) et d'un point de vue plus théorique (le point de vue du chercheur qui vise des résultats suffisamment génériques pour pouvoir s'appliquer à un ensemble le plus large possible de systèmes).

En effet, cette recherche a été effectuée au sein du Cemagref, qui est un centre de recherche finalisée. En ceci, ma position de Chargé de Recherche, puis d'Ingénieur du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (depuis fin 2003) au Cemagref n'est pas semblable à celle d'un Chargé de Recherches au CNRS, même si le Cemagref et le CNRS sont deux Établissements Public à caractère Scientifique et Technique. Ce souci de trouver une troisième voie entre la théorie et l'application est ce qui fait l'originalité du travail de chercheur au Cemagref et permet de nourrir sa recherche par l'application. J'espère en faire la démonstration dans ce document.

2.3 Modélisation des canaux

Comme montré en fig. 2.1, un canal peut être représenté comme une série de biefs interconnectés par des ouvrages hydrauliques.

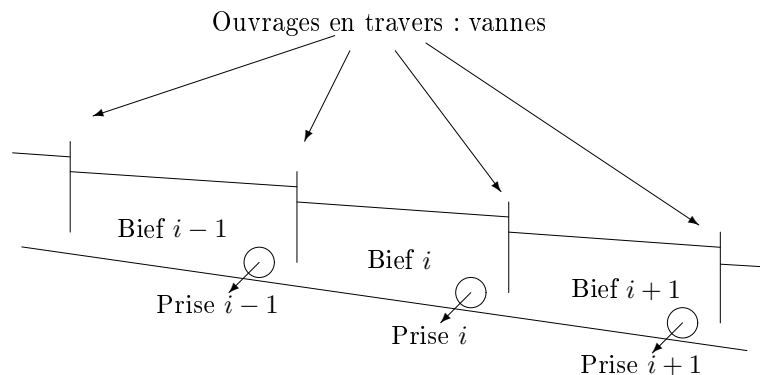


FIG. 2.1: Représentation schématique du profil en long d'un canal. Biefs, ouvrages en travers et prises latérales.

On se restreindra ici à l'étude de modèles linéaires, qui traduisent le fonctionnement du système autour d'un point de fonctionnement, généralement choisi comme un régime permanent. Cette limitation

est justifiée par le fait que les débits moyens dans les canaux varient relativement lentement. En effet, le débit moyen dépend de la demande en eau aval, qui est liée au stade d'évolution des plantes. Cette dynamique est bien plus lente que celle de l'écoulement lui-même lorsqu'il y a de petites variations liées aux comportements individuels des irrigants, ou aux perturbations extérieures. On utilise ici l'heuristique dite des gains variables, qui a montré son efficacité dans de nombreuses applications de l'Automatique [FS03].

L'intérêt de travailler avec des modèles linéaires est que l'on dispose ensuite de tous les outils de l'analyse fréquentielle développés depuis les années 1930 par les automaticiens (transformée de Laplace, diagrammes de Bode, Nyquist, Nichols, lieu d'Evans, etc.). Nous montrons la puissance de cette approche dans le cas de l'analyse de la matrice de transfert de Saint-Venant et de l'interaction entre l'écoulement et un ouvrage.

2.3.1 Modélisation de l'écoulement dans un bief

Un certain nombre (voire un nombre certain!) de modèles ont été développés dans la littérature pour représenter l'écoulement de l'eau dans un canal à surface libre. Ces modèles peuvent être classés suivant différents types selon qu'ils sont destinés à la simulation ou au contrôle. Nous avons fait le choix d'utiliser principalement un modèle très classique développé initialement en 1871 par Adhémar Jean-Claude Barré de Saint-Venant, un ingénieur des Ponts et Chaussées à la retraite, dans deux notes à l'Académie des Sciences de Paris [BdSV71]. Ce modèle est basé sur une série d'hypothèses simplificatrices (vitesse uniforme dans une section, répartition hydrostatique des pressions, pente faible), qui ont montré leur pertinence dans de très nombreuses applications pour la simulation des écoulements en rivière et en canal.

On se place tout d'abord dans le cas de petites variations de débit et de niveau autour d'un régime permanent (linéarisation), ce qui permet d'utiliser les outils d'analyse fréquentielle après passage par la transformée de Laplace. Alors, dans le cas du régime uniforme (régime permanent où la hauteur d'eau et le débit sont constants le long du bief), on obtient une solution analytique pour la fonction de transfert correspondante au modèle de Saint-Venant linéarisé. Cependant, ce cas particulier est très peu réaliste, car la majorité des écoulements en canaux sont non uniformes. Les hydrauliciens parlent alors de « courbes de remous », ou d'écoulements graduellement variés.

Dans l'objectif d'appliquer des méthodes issues de l'automatique fréquentielle au contrôle des canaux, il est utile de disposer d'un modèle précis de l'écoulement. Comme le modèle de Saint-Venant est considéré comme un bon modèle de l'écoulement par les hydrauliciens, nous avons cherché à utiliser ce modèle, linéarisé autour d'un point d'équilibre.

Deux questions se posent concernant ce modèle : comment calculer sa réponse fréquentielle dans le cas non uniforme ? Quelle est sa validité pour représenter les écoulements à surface libre dans une large gamme de fréquences ?

Si ce modèle fréquentiel était bien connu pour les écoulements uniformes, le cas des écoulements non uniformes restait largement inexploré, alors même que c'est le type d'écoulement le plus répandu. Nous avons donc cherché à déterminer la réponse fréquentielle d'un bief de la façon la plus précise possible, sans pour autant demander un grand temps de calcul. Ce point crucial est une contribution majeure de notre travail de recherche et est donc détaillé ci-dessous.

De façon concomitante, nous avons de fait validé le modèle de Saint-Venant pour une gamme de fréquences compatibles avec la conception de contrôleurs, pour des écoulements réalistes sur des canaux de dimensions variées. Il reste toutefois des choses à clarifier sur la présence de modes oscillants en hautes fréquences (ce point sera évoqué dans les perspectives).

Le modèle obtenu peut être comparé aux autres approches utilisées dans la littérature. Les approches classiques pour obtenir un modèle linéaire d'un bief autour d'un régime non uniforme sont de deux types :

- Linéarisation d'un modèle approché des équations de Saint-Venant :
 - ce modèle peut être obtenu à partir d'un schéma aux différences finies utilisé pour la résolution numérique des équations de Saint-Venant. Le schéma peut être explicite [Bal85] ou implicite [Mal94]. On obtient au final un modèle discret en temps et en espace, qui a l'inconvénient d'avoir un grand nombre d'états si l'on souhaite une bonne précision. Par construction, ce type de modèle ne représente pas bien les hautes fréquences.
 - soit un modèle de type collocation (voir par exemple la thèse [Dul01]). On obtient alors un modèle discrétisé dans l'espace mais continu en temps. Cette méthode nécessite également un

grand nombre d'états (qui correspondent au nombre de points de collocation) pour avoir une bonne précision.

- Identification directe à partir des données [Wey01]. Cette méthode donne alors un modèle de type entrée-sortie, de dimension choisie par l'utilisateur. Ce modèle n'est pas à base physique et reste donc lié à l'application considérée. Cette approche est pragmatique et efficace pour concevoir des contrôleurs mais elle ne permet pas de comprendre les limites de performance liées à la physique du phénomène.

Au final, notre approche, basée sur le modèle de Saint-Venant linéarisé permet d'avoir une réponse fréquentielle exacte autour d'un régime quelconque et permet également une analyse fine des propriétés du système, comme on le montre ci-dessous.

Modèle fréquentiel de l'équation de Saint-Venant linéarisée

La linéarisation des équations de Saint-Venant autour d'un régime non uniforme donne le système suivant :

$$T_0(x) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + 2V_0 \frac{\partial q}{\partial x} - \beta_0 q + (C_0^2 - V_0^2) T_0 \frac{\partial y}{\partial x} - \gamma_0 y = 0 \quad (2.2)$$

avec T_0 la largeur au miroir pour l'écoulement stationnaire, $C_0 = \sqrt{\frac{gA_0}{T_0}}$ la célérité des ondes gravitaires, $V_0 = \frac{Q_0}{A_0}$ la vitesse moyenne de l'écoulement, $\gamma_0 = gT_0 [(1 + \kappa_0)S_b - (1 + \kappa_0 - F_0^2(\kappa_0 - 2)) \frac{\partial Y_0}{\partial x}]$, $\beta_0 = -\frac{2g}{V_0} (S_b - \frac{\partial Y_0}{\partial x})$ avec $\kappa_0 = \frac{7}{3} - \frac{4A_0}{3T_0 P_0} \frac{\partial P_0}{\partial Y}$ et le nombre de Froude $F_0 = \frac{V_0}{C_0}$.

Le passage par la transformée de Laplace réduit cette équation aux dérivées partielles (EDP) en une équation différentielle ordinaire (EDO) en x linéaire à paramètres variants :

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} q(x, s) \\ y(x, s) \end{pmatrix} = \mathcal{A}_s(x) \begin{pmatrix} q(x, s) \\ y(x, s) \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

avec $\mathcal{A}_s(x) = \begin{pmatrix} 0 & -c(x)s \\ -d(x)s - e(x) & a(x)s + b(x) \end{pmatrix}$ et

$$a(x) = \frac{2V_0(x)}{C_0(x)^2 - V_0(x)^2} \quad (2.4)$$

$$b(x) = \frac{\gamma_0(x)}{T_0(x)(C_0(x)^2 - V_0(x)^2)} \quad (2.5)$$

$$c(x) = T_0(x) \quad (2.6)$$

$$d(x) = \frac{1}{T_0(x)(C_0(x)^2 - V_0(x)^2)} \quad (2.7)$$

$$e(x) = -\frac{\beta_0(x)}{T_0(x)(C_0(x)^2 - V_0(x)^2)} \quad (2.8)$$

Les conditions aux limites sont données par $q(0, s) = q_0(s)$ et $q(X, s) = q_X(s)$.

Cette équation ne peut pas être résolue de façon analytique, excepté dans un cas particulier (lorsque \mathcal{A}_s ne dépend pas de x , c'est-à-dire pour des conditions d'écoulement uniforme). Dans ce cas, la solution de l'équation (2.3) est obtenue par :

$$\begin{pmatrix} q(x, s) \\ y(x, s) \end{pmatrix} = \Gamma_s(x, 0) \begin{pmatrix} q(0, s) \\ y(0, s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{11}(x, s) & \gamma_{12}(x, s) \\ \gamma_{21}(x, s) & \gamma_{22}(x, s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q(0, s) \\ y(0, s) \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

où $\Gamma_s(x, 0)$ est la matrice de transition. Cette matrice de transition peut être calculée analytiquement dans le cas du régime uniforme [BSM98] :

$$\Gamma_s(x, 0) = e^{\mathcal{A}_s x}$$

La matrice de transfert du système initial (2.3) est alors obtenue par :

$$\begin{pmatrix} y(0) \\ y(X) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11}(s) & p_{12}(s) \\ p_{21}(s) & p_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q(0) \\ q(X) \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

avec $p_{11}(s) = -\frac{\gamma_{11}(X,s)}{\gamma_{12}(X,s)}$, $p_{12}(s) = \frac{1}{\gamma_{12}(X,s)}$, $p_{21}(s) = \gamma_{21}(X,s) - \frac{\gamma_{22}(X,s)\gamma_{11}(X,s)}{\gamma_{12}(X,s)}$ et $p_{22}(s) = \frac{\gamma_{22}(X,s)}{\gamma_{12}(X,s)}$, si $\gamma_{12}(X,s)$ est différent de zéro. Les valeurs de s qui annulent $\gamma_{12}(X,s)$ sont les pôles de la matrice de transfert.

Dans le cas du régime non uniforme, il n'y a plus de solution analytique de ce type. Et les solutions numériques de résolution de l'équation différentielle mènent à des temps de calcul prohibitifs pour les grandes valeurs de $|s|$, car une valeur propre est instable et fortement oscillante.

La méthode proposée se base sur une discrétisation spatiale de l'intervalle $[0, X]$ en n segments :

$$0 = x_0 < x_1 < \dots < x_k < \dots < x_n = X, \quad x_{k+1} = x_k + h_k \quad (2.11)$$

Si on note η la solution approchée, on a montré dans l'article [R8*] que le schéma suivant résolvait l'équation (2.3) au premier ordre :

$$\begin{aligned} \eta_0 &:= \zeta_0; \\ \text{pour } k &= 0, 1, \dots, n-1 : \\ \eta_{k+1} &:= e^{\mathcal{A}_s(x_k)h_k} \eta_k, \\ x_{k+1} &:= x_k + h_k \end{aligned} \quad (2.12)$$

La solution proposée revient à approcher la matrice de transition dans chaque segment par celle calculée par la méthode uniforme, c'est-à-dire en supposant que la hauteur d'eau est constante dans chaque intervalle de longueur h_k . Au final, la matrice de transition complète est approchée par :

$$\Gamma_s(X, 0) \approx \prod_{k=n-1}^0 e^{\mathcal{A}_s(x_k)h_k} \quad (2.13)$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet également d'étudier le cas non uniforme comme une succession de régimes dont la solution est obtenue analytiquement comme dans le cas uniforme.

Exemple 1 (Diagrammes de Bode) *On illustre ces résultats sur deux canaux types de géométrie trapézoïdale et différentes dimensions (voir tableau 2.1, avec X la longueur du canal (m), m le fruit des berges, B la largeur au fond (m), I la pente du fond, n le coefficient de Manning ($m^{-1/3}s$), Y_n la profondeur uniforme (m) correspondant au débit max Q_{\max} (m^3s^{-1})). Le canal 1 est un canal court oscillant et le canal 2 est un canal long et retardé.*

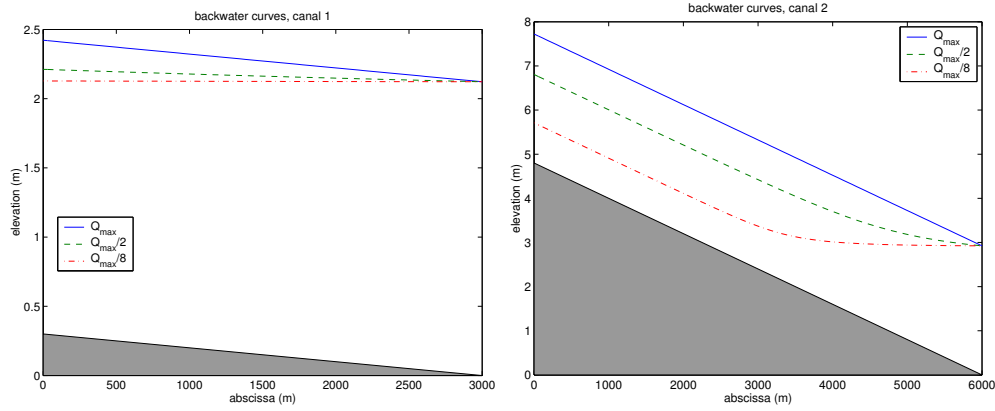
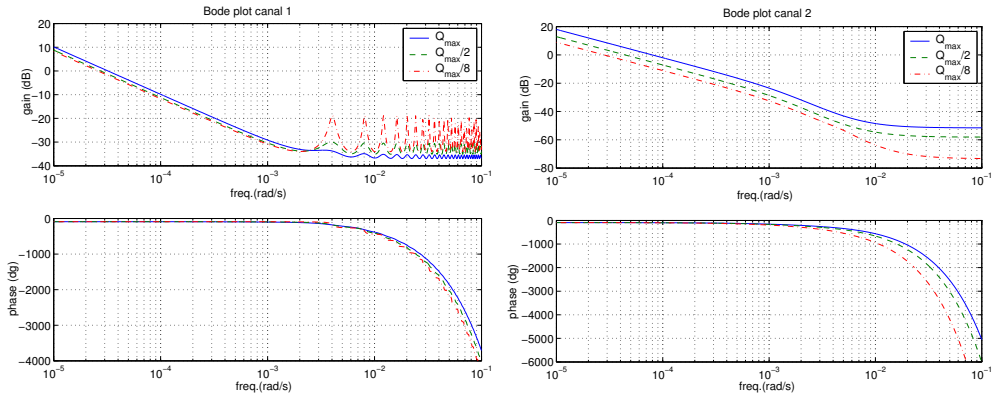
TAB. 2.1: Paramètres des deux canaux types

	X	m	B	I	n	Y_n	Q_{\max}	Q_{\min}
canal 1	3000	1.5	7	0.0001	0.02	2.12	14	1.75
canal 2	6000	1.5	8	0.0008	0.02	2.92	80	10

La figure 2.2 montre les courbes de remous obtenues pour une condition limite aval en cote correspondant au régime uniforme pour le débit max et différents débits entre $Q_{\max}/8$ et Q_{\max} .

Les diagrammes de Bode correspondants à ces trois débits sont calculés avec la méthode proposée et tracés en figure 2.3. On observe que pour le canal 1 (pente faible) les modes oscillants sont moins amortis lorsque le débit diminue, alors que pour le canal 2 (pente forte), le gain de l'intégrateur diminue. Dans les deux cas, le retard augmente lorsque le débit diminue.

Comparée à une méthode d'intégration numérique classique (Runge-Kutta), la méthode proposée permet de diviser le temps de calcul par plus de 1000 pour le calcul de 500 points de fréquence (voir [R8*]).

FIG. 2.2: Courbes de remous réelle pour $Q_{\max}/2$, canaux 1 et 2FIG. 2.3: Diagramme de Bode de $p_{21}(s)$, canaux 1 et 2 pour $Q_0 = Q_{\max}$, $Q_{\max}/2$ et $Q_{\max}/8$

Analyse fréquentielle de la matrice de transfert de Saint-Venant

Pôles L'expression analytique de la matrice de transfert dans le cas uniforme permet une analyse détaillée. En particulier, on peut calculer de façon analytique les pôles du système : si l'on choisit comme conditions aux limites les débits amont et aval, le système possède un pôle en zéro (intégrateur) et une infinité de pôles qui sont soit réels négatifs, soit complexes conjugués, avec une même partie réelle négative. Ces pôles complexes conjugués situés sur une droite dans le demi-plan négatif correspondent aux modes oscillants du bief.

Dans le cas non uniforme, nous avons proposé dans [C12] une procédure numérique basée sur la méthode de calcul de la fonction de transfert pour suivre les pôles par approximations successives des déformations de la ligne d'eau correspondant à différents régimes stationnaires.

Ceci a permis de calculer une approximation rationnelle à une précision arbitraire sur une bande de fréquences données (voir [C12]). Ce type de modèle rationnel est très utile pour la conception de contrôleurs dans l'espace d'état (minimisant un critère H_{∞} , par exemple).

Retards Il est bien connu des hydrauliciens que pour les équations de Saint-Venant, la vitesse de propagation de l'information est au plus de $V_0 + C_0$ de l'amont vers l'aval et de $C_0 - V_0$ de l'aval vers l'amont. Cela peut se traduire en automatique par la présence d'un retard pur entre une perturbation ayant lieu en un point et son effet en un autre point du bief. De façon plus générale, on peut chercher à caractériser la matrice de transfert en terme de factorisation « inner-outer », ou facteur intérieur et extérieur. Le facteur inner (ou intérieur) est à non-minimum de phase, alors que le facteur extérieur (outer) est à minimum de phase.

On a montré dans [C12] que les éléments de la matrice de transfert peuvent être factorisés de la manière suivante :

$$\begin{aligned} p_{11}(s) &= p_{11o}(s) \\ p_{12}(s) &= p_{12o}(s)e^{-\tau_2 s} \\ p_{21}(s) &= p_{21o}(s)e^{-\tau_1 s} \\ p_{22}(s) &= p_{22o}(s) \end{aligned}$$

avec $\tau_1 = \frac{X}{C_0+V_0}$ et $\tau_2 = \frac{X}{C_0-V_0}$.

Les termes $p_{ijo}(s)$ sont à minimum de phase, ils ne contiennent pas de zéros instables ni de retards. Ils peuvent donc être compensés par des contrôleurs rationnels. Ce n'est pas le cas des retards présents dans les transferts p_{12} et p_{21} , qui viennent donc limiter la performance des contrôleurs agissant sur ces transferts.

On trouve ici un exemple de la connection entre l'approche automatique et l'approche hydraulique du sujet : il est clair pour un hydraulicien qu'une perturbation se propageant vers l'aval ne peut pas aller plus vite que $V_0 + C_0$, ce que l'automaticien traduit par un retard pur. L'intérêt ici de l'approche automatique est qu'on peut montrer qu'il n'y a pas d'autre facteur limitant la performance que ce retard pur dans le terme $p_{21}(s)$ (la même remarque peut être faite pour $p_{12}(s)$). Et on montre aussi que les termes $p_{11}(s)$ et $p_{22}(s)$ n'ont pas de facteur à non minimum de phase, ce qui montre l'intérêt du contrôle local, qui n'est théoriquement pas limité en performance (cf. section 2.4).

Analyse fréquentielle La connaissance des pôles permet une analyse détaillée des éléments de la matrice de transfert. En basses fréquences, le comportement est dominé par l'intégrateur, qui traduit le fait que le niveau augmente proportionnellement à l'inverse d'une surface lorsque le débit augmente. En hautes fréquences, les modes oscillants sont prépondérants. Ils caractérisent les interactions entre des ondes se propageant vers l'aval à la vitesse $V_0 + C_0$ et vers l'amont à la vitesse $C_0 - V_0$. On peut donc en première approximation considérer un canal comme la superposition d'un intégrateur et de modes oscillants, avec deux retards pour les termes distants. Cette idée peut être formalisée comme ci-dessous, dans le modèle approché IDZ.

Extension en non uniforme Tous les résultats ci-dessus s'étendent au cas d'écoulements non uniforme, à l'aide de la méthode numérique proposée. Les retards sont alors obtenus par l'intégrale des caractéristiques, les pôles se déforment de manière continue, ainsi que le gain de l'intégrateur.

Modèles simplifiés pour la commande

La méthode numérique proposée permet de calculer un modèle fréquentiel pour tout type d'écoulement. Cependant, pour la conception de contrôleurs avancés, il est nécessaire d'avoir un modèle rationnel du système. Nous proposons deux méthodes pour cela : soit le calcul d'un modèle rationnel à partir des pôles de l'équation calculés numériquement et de la réponse fréquentielle, soit un modèle simplifié qui a l'avantage de pouvoir être calculé analytiquement à partir des paramètres physiques du bief. Nous présentons ci-dessous la seconde méthode, détaillée dans [R9*]. Le premier exemple de ce type de modèle est le modèle Intégrateur Retard ('Integrator Delay model' en anglais) proposé par Schuurmans [Sch97, SCD⁺99]. L'originalité de ce modèle est de proposer un calcul des paramètres du modèle dans le cas d'un écoulement non uniforme, alors que la plupart des modèles précédents se contentaient du cas uniforme [CPSU79, CFSU82, CSU80, Erm92]. Selon ce modèle, un bief en régime non uniforme est représenté par une partie uniforme à l'amont, représentée par un retard pur, suivi d'une partie influencée par la courbe de remous à l'aval, représentée par un intégrateur pur. Cette approximation a l'avantage d'être très simple à comprendre mais elle est basée sur un principe erroné : le retard d'un bief est toujours non nul et l'intégrateur est toujours présent. Cette méthode mène donc à une mauvaise estimation des paramètres du modèle. Le retard approché peut être très surestimé par rapport au retard du bief et le gain de l'intégrateur peut également être mal estimé par cette méthode. L'utilisation d'un tel modèle pour la conception de contrôleur peut donc mener à des performances très mauvaises, voire à des instabilités.

Nous avons donc proposé un nouveau modèle simplifié, qui améliore le modèle intégrateur retard par l'ajout d'un gain statique en hautes fréquences (ce qui ajoute un zéro à la fonction de transfert). Le modèle approché IDZ (pour Integrator-Delay-Zero) est basé sur l'analyse fréquentielle du modèle complet

et sur une approximation de la courbe de remous. En basses fréquences, on a vu que c'est l'intégrateur et le retard qui dominent le comportement fréquentiel des éléments de la matrice de transfert. En hautes fréquences, la matrice de transfert présente des modes oscillants, qu'on modélise pour simplifier par un gain constant, noté $p_{ij\infty}$. Enfin, la courbe de remous est approchée par deux droites, l'une à l'aval tangente à la courbe de remous condition limite aval et l'autre à l'amont égale à la hauteur pour le régime uniforme. Ceci permet de calculer la matrice de transition de chaque portion du bief. Le transfert complet est alors obtenu par l'interconnection des deux matrices de transition, ce qui permet d'obtenir des résultats analytiques. Au final, on obtient le modèle suivant :

$$p_{11}(s) = \frac{a_{11}s + b_{11}}{s} \quad (2.14)$$

$$p_{12}(s) = -\frac{a_{12}s + b_{12}}{s} e^{-\tau_2 s} \quad (2.15)$$

$$p_{21}(s) = \frac{a_{21}s + b_{21}}{s} e^{-\tau_1 s} \quad (2.16)$$

$$p_{22}(s) = -\frac{a_{22}s + b_{22}}{s} \quad (2.17)$$

où a_{ij} est le gain constant en hautes fréquences et b_{ij} le gain de l'intégrateur, τ_1 et τ_2 les retards amont-aval et aval-amont.

Les paramètres de ce modèle peuvent être calculés de façon analytique à partir des paramètres physiques du bief (débit, pente, frottement, géométrie, condition aval). Un tel modèle est très utile pour la conception automatique de contrôleurs, ou même l'analyse du dimensionnement des canaux sur leur performance en termes de gestion.

Exemple 2 (Comparaison avec le modèle complet) *On illustre ces résultats sur les deux canaux types du tableau 2.1. La figure 2.4 montre les courbes de remous réelles et approchées pour les deux canaux types pour un débit moyen $Q_{\max}/2$. L'intersection des deux droites fixe la limite de la partie uniforme et de la partie influencée par la courbe de remous. Dans le cas du canal 1, tout le bief est sous l'influence de la courbe de remous.*

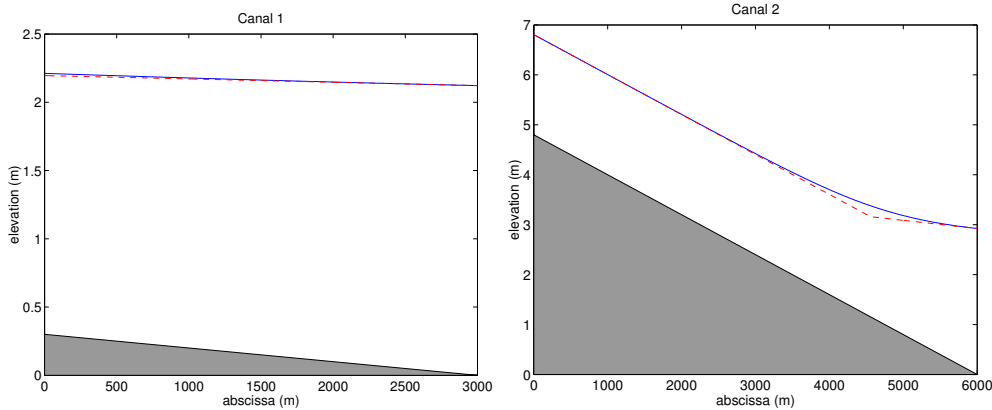


FIG. 2.4: Courbes de remous réelle (—) et approchée (---) pour $Q_{\max}/2$, canal 1 et 2

La figure 2.5 compare pour les deux canaux le modèle complet au modèle approché. On observe qu'en basses fréquences l'intégrateur est bien modélisé, ainsi que le gain statique en hautes fréquences. Le déphasage lié au retard est également bien reproduit par le modèle approché.

Ce modèle IDZ permet de concevoir des contrôleurs simples (typiquement des contrôleurs PI), directement à partir des paramètres physiques du bief. C'est donc un outil pratique qui répond au problème posé initialement pour une méthode générique de conception de contrôleurs pour un canal d'irrigation.

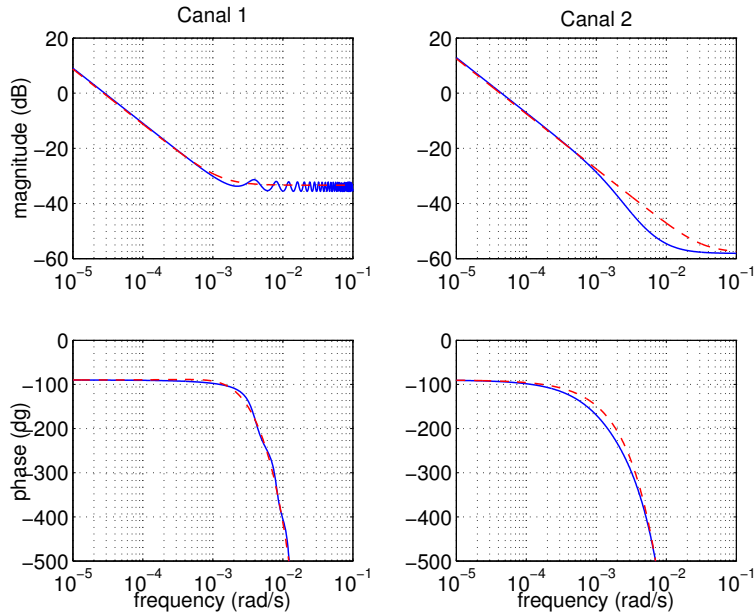


FIG. 2.5: Diagramme de Bode de $p_{21}(s)$ (—) et du modèle approché IDZ (---), canal 1 et 2 pour $Q_0 = Q_{\max}/2$

Perspectives

Nous proposons deux perspectives pour ce travail de modélisation fréquentielle de Saint-Venant, l'une plus théorique, l'autre plus pratique.

À la recherche des modes de Saint-Venant Le modèle de Saint-Venant prédit correctement les premiers modes oscillants de l'écoulement, qui ont été observés expérimentalement (cf. [C18] et [R16*] par exemple). Ce modèle n'est cependant pas dispersif et l'amplitude des modes est indépendante de la fréquence du mode, ce qui est clairement visible dans le diagramme de Bode. Ceci marque la limite de validité du modèle de Saint-Venant, qui suppose une faible courbure de la ligne d'eau, ce qui est vrai pour les basses fréquences. Il serait donc intéressant de déterminer plus nettement le domaine de validité de l'équation, voire de modifier l'équation de Saint-Venant pour prendre en compte le fait que les modes sont coupés en hautes fréquences.

Une possibilité est de partir des équations de Navier-Stokes et de dériver les équations de Saint-Venant par agrégation sur la profondeur et la largeur de l'écoulement. On pourrait alors trouver une équation de Saint-Venant modifiée qui reproduise correctement les premiers modes et qui intègre un aspect dispersif pour reproduire l'atténuation en hautes fréquences.

Ce sujet peut avoir une application dans le choix des paramètres des schémas numériques de résolution des équations de Saint-Venant. En effet, les schémas utilisés (Preissmann) sont en général dissipatifs, pour atténuer les erreurs numériques toujours présentes lors de la résolution. En particulier, le schéma de Preissmann est dissipatif pour des valeurs du coefficient de pondération θ supérieures à 0,5.

Une fois déterminé le terme d'atténuation en hautes fréquences, on pourrait envisager de choisir le coefficient θ tel que la diffusion numérique soit égale à la diffusion hydraulique. Cette méthode a déjà été appliquée par Cunge dans son analyse du modèle de Muskingum [Cun69].

Classification des biefs pour le contrôle D'un point de vue plus pratique, il est important de pouvoir classer les biefs de canaux dans un but de contrôle automatique. Ainsi, puisqu'on peut calculer les pôles du bief, et que la dynamique du bief est liée aux pôles, on peut imaginer classer les biefs pour le contrôle à partir des pôles.

Ce travail fait l'objet d'un article en cours de rédaction avec Jean-Pierre Baume. Pour une approche générique, on propose de considérer une expression adimensionnelle des équations de Saint-Venant. L'écou-

lement est alors caractérisé par trois nombres adimensionnels, le nombre de Froude F_0 , le nombre proposé par Baume $\chi = XS_b/Y_n$ [BS97] et κ_0 , un nombre adimensionnel lié à la géométrie du bief.

On cherche ensuite à caractériser l'écoulement en fonction de l'objectif de contrôle en temps réel. Dans ce cas, on considère deux critères : l'un concernant le caractère oscillant ou non du bief, l'autre concernant l'influence aval en basses fréquences. En effet, la présence de modes oscillants va limiter la performance de contrôleurs de type PI, car on devra filtrer ces modes. De plus, la présence d'une influence non négligeable du débit aval sur la cote amont indique que ce bief sera fortement couplé au bief amont.

Cette méthode peut être appliquée directement dans le cas d'un écoulement uniforme, puisque les pôles peuvent être calculés de manière explicite. Dans le cas non uniforme, il faut étendre l'approche de façon numérique, en calculant les pôles et la valeur des gains des intégrateurs des fonctions de transfert. Cette approche peut également être développée en considérant explicitement le type de contrôle considéré et la performance qu'on peut en attendre. À terme, il est envisageable de développer un critère permettant de prendre en compte l'objectif de contrôle des canaux dès la conception pour leur dimensionnement.

2.3.2 Modélisation des ouvrages hydrauliques

Pour modéliser complètement un canal, il est nécessaire de prendre en compte les ouvrages hydrauliques (vannes ou seuils), pour lesquels les hypothèses du modèle de Saint-Venant ne sont pas vérifiées. Ces ouvrages sont généralement modélisés par des équations algébriques, appelées « lois de débit » et basées sur le théorème de Bernoulli. Un des axes de recherche des hydrauliciens consiste à trouver des lois de débit qui représentent correctement un large éventail de situations représentatives des écoulements dans les ouvrages : passage en charge/surface libre, passage noyé/dénoué, etc. Comme ce n'est pas l'objet de ma recherche, je ne m'appesantirai pas sur ces différents aspects de la modélisation. On considérera ici deux types d'ouvrages : les ouvrages statiques, qui sont décrits par une seule équation algébrique reliant variables hydrauliques et géométrie de l'ouvrage, et les ouvrages dynamiques, qui intègrent une équation supplémentaire traduisant un équilibre hydro-mécanique.

Je parlerai donc d'ouvrage statique pour un ouvrage décrit par une équation statique et d'ouvrage dynamique pour un ouvrage décrit par une équation dynamique. Cependant, les ouvrages statiques comme des vannes par exemple peuvent être manipulés pour laisser passer un débit plus ou moins important.

Ouvrages statiques

On considère tout d'abord un ouvrage qui interconnecte deux biefs, comme décrit en figure 2.6 dans le cas d'une vanne. La méthode décrite est également applicable à un seuil ou à un quelconque ouvrage décrit par une équation statique.

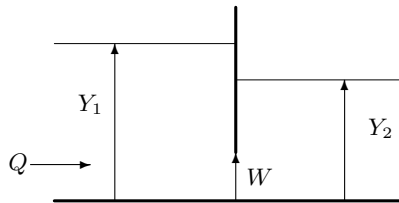


FIG. 2.6: Représentation schématique de deux biefs séparés par une vanne

On note classiquement Q le débit de la vanne, Y_1 le niveau amont de vanne (qui correspond au niveau aval du bief 1), Y_2 le niveau aval de vanne (qui correspond au niveau amont du bief 2) et W l'ouverture de la vanne. L'équation de débit de la vanne s'écrit :

$$Q = f(Y_1, Y_2, W) \quad (2.18)$$

Pour une vanne de type orifice noyé, la fonction f est donnée par :

$$f(Y_1, Y_2, W) = C_d \sqrt{2g} L_g W \sqrt{Y_1 - Y_2}$$

avec C_d un coefficient de débit (proche de 0,8), L_g la largeur de la vanne et g l'accélération de la pesanteur.

Comme on utilise une approche linéaire, on considère des petites variations d'ouverture w , de débit q et de niveau y_1 et y_2 , pour obtenir l'équation de débit de la vanne :

$$q(t) = k_u y_1(t) - k_d y_2(t) + k_w w(t) \quad (2.19)$$

avec $q(t)$ l'écart en débit à la valeur de référence Q , $y_i(t)$ les écarts en niveau aux valeurs de référence Y_i ($i = 1, 2$), w l'écart à l'ouverture de référence W , les coefficients k_u , $-k_d$ et k_w sont obtenus en différenciant la fonction f de l'équation (2.18) par rapport à ses arguments.

Un ouvrage statique sera donc représenté par une équation de débit exprimée sous la forme d'une relation linéaire entre débit, ouverture et niveaux.

Ouvrages dynamiques

Pour modéliser un ouvrage dynamique, il est nécessaire d'écrire une équation supplémentaire, qui traduit la conservation de l'énergie ou de la quantité de mouvement.

Suivant le type de vanne considéré, il y a différentes méthodes pour écrire cette équation supplémentaire. Suite à un travail d'expertise sur un canal au Nigéria (qui a donné lieu aux rapports [M1] et [M2]), j'ai été amené à travailler sur une vanne hydro-mécanique à niveau amont constant, dite vanne Begemann ou Vlugter, du nom des ingénieurs hollandais qui les ont décrites et étudiées dans les années 1940 [Vlu40].

Cette vanne peut pivoter autour d'un axe en fonction de la pression de l'eau qui induit un moment ouvrant et de l'effet d'un contrepoids qui induit un moment fermant (voir figure 2.7). La vanne se stabilise à une ouverture pour laquelle le moment ouvrant et le moment fermant s'équilibrent. Il faut donc déterminer deux lois :

- une loi de débit pour cette vanne d'un type particulier, permettant de calculer le débit pour toute ouverture et niveau amont (la vanne Begemann est conçue pour fonctionner en dénoyé, le niveau aval n'intervient donc pas dans ce cas) ;
- une loi traduisant l'équilibre des moments. La difficulté est de modéliser correctement le moment ouvrant, puisqu'on ne connaît pas le champ de pression lorsque la vanne est ouverte.



FIG. 2.7: Vannes Begemann du régulateur Furawa du canal de Hadedjia, Nigeria

Ce travail effectué en collaboration avec Gilles Belaud de l'École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (ENSAM), Jean-Pierre Baume et José Ribot-Bruno s'est étalé sur plusieurs années, avec un aspect expérimental (conception et construction de deux modèles réduits de vanne, installation de capteurs d'angles et de niveau, nombreux essais) et un aspect plus théorique de modélisation. On a proposé un modèle de vanne avec une loi de débit et une loi calculant la force à l'équilibre, exprimés sous la forme d'une cubique en fonction de l'angle d'ouverture, puisqu'on peut déterminer assez précisément les valeurs extrêmes et leurs dérivées. Ce travail a donné lieu à une publication [R11*] récompensée par le « Best Paper Award » du Journal of Irrigation and Drainage Engineering pour l'année 2005.

Il faut noter qu'en toute rigueur, le modèle que nous avons proposé est un modèle statique, puisque nous avons supposé que la dynamique d'établissement de l'équilibre était négligeable. Pour prendre en compte l'aspect dynamique, il faudrait considérer le moment d'inertie de la vanne et écrire l'équation de conservation de la quantité de mouvement.

Perspectives

Modélisation en noyé La vanne Vlugter [Vlu40] est une vanne dérivée de la vanne Begemann, conçue pour contrôler un niveau amont indépendamment du niveau aval et du débit. La vanne Vlugter possède un compartiment aval de forme semi-circulaire dont le centre est situé sur le point de pivot, ce qui permet en théorie d'annuler le moment de la force exercée par l'aval (voir en figure 2.8 le modèle réduit de vanne Vlugter que nous avons installé dans le canal de l'ENSAM). Nous cherchons à étendre le modèle développé pour la vanne Begemann pour prendre en compte l'effet du niveau aval lorsque la vanne fonctionne en noyé. Dans ce cas, il faut modifier la loi de débit pour prendre en compte l'influence du niveau aval et la loi de la force à l'équilibre puisque la position d'équilibre elle-même est modifiée par le niveau aval. Ce travail développé en collaboration avec Gilles Belaud de l'ENSAM et Bertus De Graaff de TU Delft aux Pays-Bas est actuellement en cours de rédaction.



FIG. 2.8: Modèle réduit de vanne Vlugter installé dans le canal de l'ENSAM

Analyse de stabilité dynamique L'interaction bief/ouvrage est critique lorsqu'il s'agit d'un ouvrage dynamique, qui peut donc interagir avec son environnement. Du point de vue de l'automaticien, une vanne statique induit un feedback local de type proportionnel, alors qu'une vanne hydro-mécanique est un contrôleur dynamique. Il est donc important d'assurer la stabilité de cette interaction lorsqu'on installe ce type d'ouvrages dans un canal. Si l'on considère dans un premier temps les petites variations autour d'un régime permanent, on peut utiliser les outils de l'analyse fréquentielle pour étudier l'interaction entre ce contrôleur dynamique et le bief. Ce travail se rapproche des développements ci-dessous concernant l'analyse de l'interaction entre un bief et une vanne, dans le cadre d'un ouvrage statique induisant un

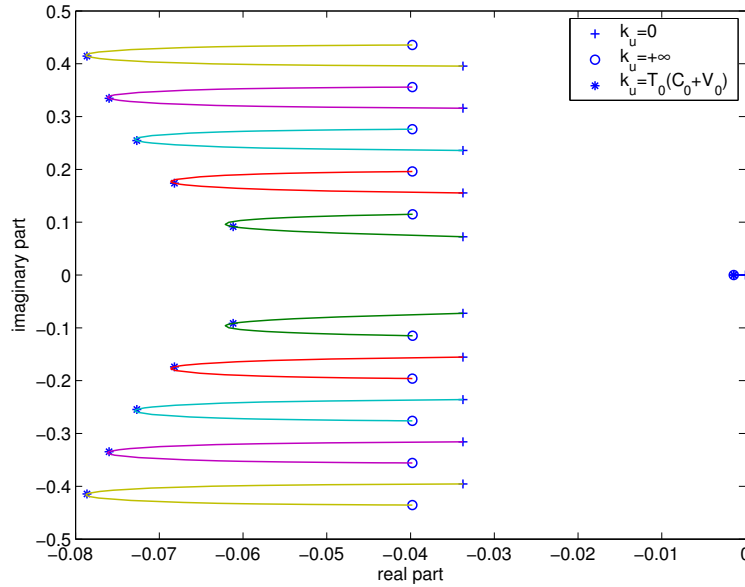


FIG. 2.9: Lieu des pôles pour le canal type 1 : pôles (+) obtenus pour $k_u = 0$, zéros (o) obtenus pour $k_u = +\infty$ et pôles en boucle fermée (*) pour $k_u = T_0(C_0 + V_0)$

feedback proportionnel entre la cote aval et le débit aval.

2.3.3 Interaction bief-ouvrage

Un ouvrage, qu'il soit statique ou dynamique, interagit avec les deux biefs qu'il relie. On s'intéresse ici au cas d'un ouvrage statique, qui permet d'obtenir des résultats génériques. On étudie d'abord l'impact d'un tel ouvrage situé à l'aval d'un bief sur les pôles de la fonction de transfert du bief. Puis on étudie l'interaction dynamique de deux biefs interconnectés par un ouvrage, qui est utile pour le calcul de l'ouverture pour obtenir un débit désiré.

Impact d'un ouvrage sur les pôles de l'équation de Saint-Venant linéarisée

Un ouvrage hydraulique peut donc être considéré comme un contrôleur frontière proportionnel. Cet aspect sera développé plus avant dans la section 2.4 de ce mémoire. Mais il est intéressant de considérer l'effet de ce contrôleur proportionnel sur les pôles du bief. En effet, on a montré dans [R16*] qu'un ouvrage hydraulique peut considérablement atténuer les modes oscillants d'un bief. Un exemple en est donné en figure 2.9, où on a tracé le lieu des pôles pour un contrôleur proportionnel situé à l'aval du bief $q(X, s) = k_u y(X, s)$ (X représente la longueur du bief). Pour $k_u = 0$, on retrouve les pôles en boucle ouverte, pour $k_u = +\infty$, on retrouve les zéros et pour $k_u = T_0(C_0 + V_0)$, où T_0 est la largeur au miroir, V_0 la vitesse et C_0 la célérité, on a des pôles fortement amortis. Ce phénomène peut être mis en relation avec l'adaptation d'impédance dans les circuits électriques, ou avec une approche utilisant les invariants de Riemann et sera évoqué à la section suivante.

Il est également intéressant dans une optique de gestion d'étudier le comportement du bief en basses fréquences en fonction des caractéristiques de l'ouvrage aval. Dans ce cas, le comportement dominant est l'intégrateur retardé et le bouclage avec un contrôleur proportionnel donne un premier ordre, qui a un temps de réponse à un échelon d'autant plus rapide que le gain du feedback est grand.

Ceci est très simple à voir dans le cas d'un intégrateur retard adimensionnel. Le bief est alors représenté par :

$$y = \frac{e^{-s}}{s} q_0 - \frac{1}{s} q_1$$

avec y le niveau aval, q_0 le débit amont et q_1 le débit aval. Le gain de l'intégrateur et le retard sont rendus unitaires par une opération de mise à l'échelle.

L'ouvrage de régulation aval est alors représenté par un contrôleur amont local, dont le gain dépend de la largeur de l'ouvrage : plus le seuil ou la vanne est large, plus le gain du contrôleur est important. Ceci se traduit par :

$$q_1 = ky$$

Le système en boucle fermée qui relie le débit amont au débit aval est un premier ordre :

$$q_1 = \frac{ke^{-s}}{s+k}q_0$$

de gain statique égal à 1 (ce qui traduit le fait qu'en basses fréquences, le débit aval est égal au débit amont) et dont le temps de réponse est d'autant plus petit que le gain k est grand.

Ainsi, on retrouve une propriété bien connue des concepteurs de canaux : on accélère le transfert de débit dans un bief lorsqu'on installe des seuils en « bec de canard », qui induisent des feedbacks à grand gain. Cette propriété est bien connue des hydrauliciens, mais n'avait jamais été mise en évidence et expliquée de façon claire. On voit ici tout l'intérêt d'une approche linéaire fréquentielle et la puissance des outils de l'Automatique pour une compréhension fine des processus dynamiques.

Modélisation dynamique de l'interaction entre deux biefs

Lorsqu'un ouvrage est manipulé (ouverture ou fermeture, supposée sous forme d'échelon), le débit passant à travers l'ouvrage sera modifié et les deux biefs amont et aval de l'ouvrage vont réagir. Il est bien sûr possible d'utiliser un modèle complet pour prédire le comportement dynamique des deux biefs à une ouverture ou une fermeture de l'ouvrage mais il est possible d'utiliser les modèles simplifiés proposés ci-dessus pour avoir une bonne approximation de l'évolution dynamique du débit.

L'intérêt de cette étude de l'interaction d'un bief et d'un ouvrage est double : d'une part, elle permet de comprendre et d'analyser le comportement dynamique avec un modèle simple mais précis. D'autre part, elle est très utile pour la mise en œuvre de contrôleurs discrets en débit. Dans ce cas, la variable de contrôle est le débit et un contrôleur esclave est généralement utilisé pour déterminer l'ouverture de l'ouvrage nécessaire pour obtenir le débit désiré. Ceci est possible lorsqu'on contrôle l'ouvrage en continu mais pose problème lorsqu'on contrôle l'ouvrage à des temps discrets. L'analyse de la dynamique du système pour des échelons d'ouverture permet de contourner partiellement ce problème en calculant l'ouverture nécessaire pour délivrer un débit moyen pendant la période d'échantillonnage.

L'utilisation du modèle approché IDZ pour chaque bief permet d'avoir une expression analytique pour le débit qui s'écoule par la vanne après une opération (ouverture ou fermeture). Cette estimation dynamique du débit est tout à fait correcte pour des petites variations (hypothèse linéaire), comme présenté en figure 2.10, qui compare les différentes approximations utilisées pour le calcul du débit à une vanne après un échelon d'ouverture.

L'approximation statique fait l'hypothèse que les niveaux amont et aval de vanne ne sont pas influencés par la manoeuvre de la vanne. C'est la plus mauvaise approximation, qui paradoxalement est la plus utilisée en pratique en raison de sa simplicité.

L'approximation dynamique est très proche du débit calculé par le modèle complet non linéaire. Il est intéressant de noter que l'approche dynamique étend naturellement l'approche proposée par De Leon [DLM86] en 1986 basée sur les caractéristiques : il utilisait également une approximation linéaire pour l'écoulement et il estimait les variations de niveau induites par la variation de débit à la vanne par la méthode des caractéristiques [CHV80] pour un canal horizontal et sans frottement. Cette approche revient en fait à ne considérer que le terme haute fréquence dans le modèle IDZ des deux biefs. Dans ce cas, on obtient donc un débit égal au débit de pointe à $t = 0$ lors d'une ouverture en échelon. Ceci améliore l'approximation statique, mais il est clair qu'une approximation qui prend en compte la dynamique haute et basse fréquences des biefs amont et aval améliore grandement l'estimation du débit.

On peut ensuite utiliser cette approximation dynamique linéaire pour calculer l'ouverture à appliquer pour avoir un débit désiré à la vanne pendant un temps donné T_s (qui correspond à la période d'échantillonnage). Comme il n'est pas possible de conserver un débit constant, on cherche à ce que la vanne délivre un volume total correspondant au débit moyen pendant la période T_s . Un calcul élémentaire d'intégrale nous donne le résultat.

Ce travail a été validé expérimentalement sur des vannes du canal de Gignac et donnera lieu à une publication actuellement en cours de rédaction.

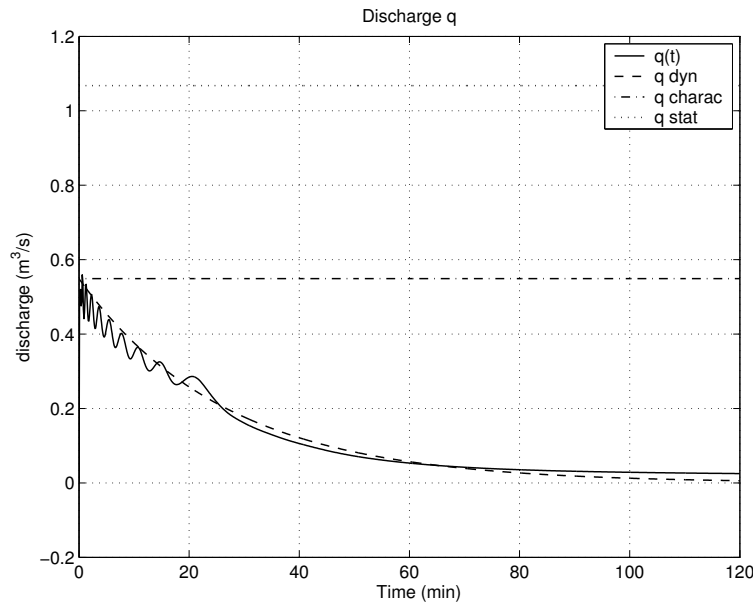


FIG. 2.10: Variation du débit $q(t)$ en fonction du temps pour un échelon d'ouverture $w_0 = 0.03$ m. Comparaison avec les approximations dynamique, caractéristique et statique.

Perspectives

Modélisation dynamique de l'interaction : cas d'un partiteur La méthode proposée ci-dessus pour le calcul du débit à un ouvrage peut être étendue au cas d'un partiteur, où deux ouvrages sont utilisés pour relier trois biefs. On obtient alors un système du second ordre, au lieu d'un premier ordre, tous les résultats restant analytiques. Cette méthode pourrait permettre de fournir des consignes d'ouvertures pour améliorer la gestion manuelle de canaux avec des gros canaux secondaires, comme en Inde ou au Pakistan.

Prise en compte de l'aspect dynamique dans la conception des ouvrages Puisqu'on dispose d'une méthode pour évaluer l'effet des ouvrages sur la dynamique du bief, on peut envisager d'utiliser cette méthode pour aider à la conception des ouvrages hydrauliques. En effet, la conception d'ouvrages hydrauliques est le plus souvent effectuée en fonction du comportement statique du système. L'aspect dynamique est très rarement pris en compte, à cause de la complexité de l'étude directe en temporel (il faudrait réaliser un grand nombre de simulations). L'approche fréquentielle permet d'envisager une étude systématique de la dynamique linéaire du système autour de différents points de fonctionnement. De plus, l'utilisation du modèle approché IDZ permet de proposer des lois de conception simples, qui pourraient par exemple être mises en œuvre sur un tableur.

2.4 Contrôle des canaux

Le problème du contrôle des canaux peut être considéré de deux façons distinctes : on peut soit chercher à améliorer la gestion des canaux à l'aide de l'Automatique, soit considérer les canaux comme une application pour des approches théoriques. En effet, comme on l'a vu dans la section sur la modélisation, les canaux cumulent un grand nombre de difficultés pour le contrôle : retard, dimension infinie, non linéarités, etc., ce qui a aiguisé l'intérêt de nombreux chercheurs.

Cependant, les nombreuses publications du domaine n'explicitaient pas clairement le compromis fait dans la méthode de contrôle. L'enjeu ici n'est pas de proposer une méthode « qui marche » mais bien d'explicitier avec le gestionnaire le compromis qu'il désire pour la gestion de son canal. A la charge ensuite de l'automaticien de concevoir un contrôleur qui réalise le compromis désiré.

Les gestionnaires de canaux d'irrigation doivent faire face à des demandes contradictoires : il leur faut

à la fois satisfaire au mieux les usagers qui payent l'eau et réclament un service efficace en retour et gérer au mieux la ressource, c'est à dire ne prélever sur le milieu naturel que la stricte quantité d'eau nécessaire à ces usages. Cette tâche est difficile compte-tenu des fortes contraintes liées aux systèmes à surface libre (en particulier le temps de retard important entre la ressource amont et l'usage aval).

Dans ce cadre, le premier travail du chercheur ayant pour but de proposer des outils pour améliorer la gestion des canaux consiste à traduire le problème de gestion sous la forme d'un cahier des charges pour la conception d'un contrôleur automatique.

C'est la principale contribution de notre travail sur le contrôle des canaux. Nous avons montré trois points essentiels :

- La performance en rejet de perturbations aval est limitée structurellement par le retard amont-aval (gestion par l'aval distant) ;
- Une gestion par l'amont local permet de s'affranchir de cette contrainte de performance mais implique un gaspillage nécessaire d'eau ;
- L'automatique apporte des outils pour gérer le compromis performance / économie d'eau (gestion mixte amont local / aval distant).

Je commencerai par analyser les structures de contrôle en fonction des objectifs de gestion, puis je détaillerai mes contributions pour le réglage de contrôleurs pour un bief puis pour un canal.

2.4.1 Structures de contrôle d'un canal

Les canaux d'irrigation sont conçus pour assurer une distribution gravitaire de l'eau, au moins dans le réseau primaire. Les prises sont généralement situées à l'aval des biefs et le débit qui coule dans les prises gravitaires dépend du niveau aval du bief. Dans notre contexte, la gestion opérationnelle du canal se traduit par un contrôle efficace du niveau aval des biefs, en général pour rejeter des perturbations inconnues (les ouvertures des vannes de prise).

Un canal d'irrigation est donc représenté comme une série de biefs (voir figure 2.11). Chaque bief représente une portion de canal entre deux ouvrages de régulation. Pour le bief i , on note u_i la variable de contrôle amont (débit), u_{i+1} la variable de contrôle aval, y_i la variable contrôlée (hauteur d'eau à l'aval) et p_i la perturbation (prise d'eau).

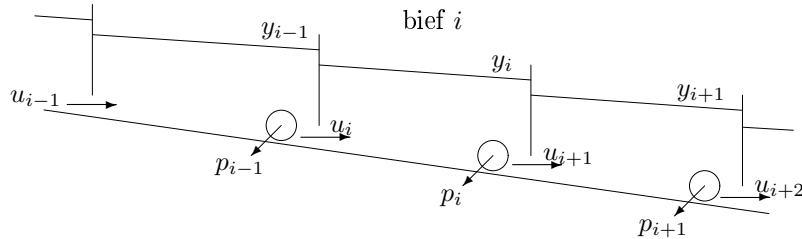


FIG. 2.11: Représentation schématique du profil en long d'un canal. Variables de commande u_i , variables contrôlées y_i et perturbations p_i .

Pour simplifier la présentation, on utilise les notations suivantes pour les fonctions de transfert du bief i :

$$y_i(s) = G_i(s)u_i(s) + \tilde{G}_i(s)(u_{i+1}(s) + p_i(s)) \quad (2.20)$$

où la perturbation $p_i(s)$ est supposée agir additivement sur le débit aval u_{i+1} .

Au final, un canal est donc représenté par :

$$y = Gu + \tilde{G}p$$

avec G une matrice bidiagonale :

$$G = \begin{pmatrix} G_1(s) & \tilde{G}_1(s) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_i(s) & \tilde{G}_i(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_n(s) & \tilde{G}_n(s) \end{pmatrix}$$

et $\tilde{G} = \text{diag}(\tilde{G}_i(s))$.

Si l'on considère un seul bief, on peut contrôler le niveau aval à l'aide de la vanne amont ou de la vanne aval, ou des deux. Ces trois situations représentent les trois méthodes classiques de contrôle décentralisé d'un canal.

On distingue trois méthodes décentralisées pour le contrôle d'un bief de canal : le contrôle aval distant, le contrôle amont local et le contrôle mixte (voir figure 2.12).

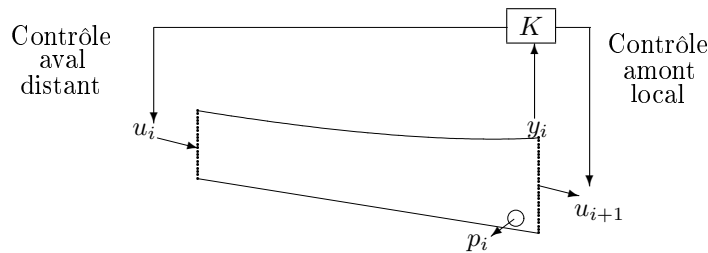


FIG. 2.12: Contrôle amont local et aval distant d'un bief de canal

Nous rappelons les points principaux concernant la performance et la gestion de la ressource en eau pour chacune de ces trois méthodes. Ce travail, lié à la thèse de Iana Guenova, a été présenté dans [C13, C15, C17].

Contrôle aval distant

Le contrôle aval distant d'un bief de canal consiste à contrôler le niveau aval y_i à l'aide du débit amont u_i . On note r_i la référence, e_i l'erreur de poursuite et K_{ii} la fonction de transfert du contrôleur aval distant.

L'erreur de poursuite e_i s'obtient par :

$$e_i = (1 + G_i K_{ii})^{-1} (r_i - \tilde{G}_i p_i) \quad (2.21)$$

Le rejet de perturbations est directement caractérisé par le module de la fonction de transfert $\tilde{G}_i (1 + G_i K_{ii})^{-1}$. L'objectif de contrôle est de trouver un contrôleur linéaire K_{ii} tel que

$$\left| \tilde{G}_i(j\omega) (1 + G_i(j\omega) K_{ii}(j\omega))^{-1} \right| \approx 0$$

sur la bande de fréquence la plus large possible.

Cependant, la fonction de transfert $G_i(s)$ contient un retard qui limite la bande passante et donc la performance du système contrôlé. Il est bien connu qu'un retard τ_i limite la bande passante à environ $1/\tau_i$. Des perturbations imprévues d'une fréquence plus élevée que $1/\tau_i$ ne seront pas rejetées par le contrôleur.

Ainsi, le contrôle aval distant conduit à une bonne efficacité de l'eau, puisqu'il adapte le débit amont à la demande aval, mais à une faible performance par rapport aux perturbations imprévues, à cause du retard. En effet, si un prélèvement imprévu a lieu dans le bief, le contrôleur va augmenter le débit amont en conséquence. La gestion de la ressource est donc économique, puisque seulement le débit nécessaire aux besoins sera prélevé, mais avec une faible performance vis-à-vis des utilisateurs, qui devront attendre que l'eau arrive pour que leurs demandes soient satisfaites.

Contrôle amont local

Le contrôle amont local d'un bief de canal consiste à contrôler le niveau aval de bief y_i à l'aide du débit aval u_{i+1} . Dans ce cas, le contrôleur amont local est noté K_{i+1i} et la boucle fermée est donnée par :

$$e_i = (1 + \tilde{G}_i K_{i+1i})^{-1} (r_i - \tilde{G}_i p_i)$$

Le rejet de perturbation est relié au module de la fonction de transfert $\tilde{G}_i(1 + \tilde{G}_i K_{i+1i})^{-1}$, qui doit être petit sur la plus grande bande de fréquence. Comme il n'y a pas de retard dans ce cas, la bande passante maximale est uniquement contrainte par les actionneurs.

Ainsi, le contrôle amont local conduit à une très bonne performance vis-à-vis de perturbations imprévues, mais au prix d'une faible efficacité de l'eau, puisque toutes les perturbations sont rejetées vers l'aval sans changer le débit amont. En effet, lorsque la demande en eau décroît, la seule possibilité de maintenir le niveau aval est de laisser le débit en trop partir vers l'aval, ce qui conduit à une gestion dispendieuse en eau.

Contrôle mixte amont local/aval distant

Dans le cas général, on souhaiterait utiliser les deux variables de contrôle u_i et u_{i+1} pour contrôler y_i . Dans ce cas, le contrôleur $K(s)$ est donné par :

$$K(s) = \begin{pmatrix} K_{ii}(s) \\ K_{i+1i}(s) \end{pmatrix}$$

La matrice de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$G(s)K(s) = (G_i(s)K_{ii}(s) + \tilde{G}_i(s)K_{i+1i}(s))$$

La structure de ce contrôleur mixte correspond à l'addition des deux contrôleurs classiques :

$$G(s)K(s) = \underbrace{G_i(s)K_{ii}(s)}_{\text{Aval distant}} + \underbrace{\tilde{G}_i(s)K_{i+1i}(s)}_{\text{Amont local}}$$

On pourrait penser de façon naïve qu'il serait suffisant de concevoir un contrôleur amont local et un contrôleur aval distant et de les additionner. Ce n'est pas le cas, car on a alors un problème multivariable pour lequel il est nécessaire de concevoir les deux contrôleurs de façon intégrée. Nous pouvons utiliser la structure multivariable de ce contrôleur pour utiliser les deux politiques de contrôle dans le but de réaliser le compromis désiré entre la satisfaction des usagers et la gestion de la ressource. Au final, l'utilisation conjointe des deux variables de contrôle permet de montrer tout le potentiel de la commande multivariable pour un bief de canal.

Cependant, contrairement aux politiques classiques, le contrôle mixte pose un vrai problème multivariable, où la robustesse est difficile à prendre en compte. Il est possible d'utiliser le cadre de l'optimisation H_∞ pour résoudre ce problème, en prenant en compte des contraintes de performance et de robustesse (voir les articles [C15] et [R13*]). On peut également utiliser des contrôleurs PI et évaluer les marges de robustesse *a posteriori*.

Cette étude de la structure des différents contrôleurs décentralisés est indépendante du type de contrôleur choisi. Quel que soit le contrôleur linéaire choisi pour le contrôle aval distant, sa performance sera limitée par le retard. De même, la gestion de la ressource n'est pas prise en compte dans la structure amont local et ne dépend donc pas du type de contrôleur choisi. Le contrôle mixte est finalement un contrôleur multivariable qui peut être représenté comme la somme de deux contrôleurs monovariabiles dont la conception doit être faite conjointement. Le contrôleur mixte est illustré dans le cas d'un bief à la section suivante.

2.4.2 Contrôle d'un bief

On présente dans cette section les résultats obtenus sur les méthodes de contrôle d'un bief, soit avec un point de vue relativement théorique (contrôle frontière de l'équation linéarisée et contrôle mixte H_∞), soit avec un point de vue plus pratique (réglage de contrôleurs PI robustes et calage automatique).

Contrôle mixte d'un bief

Pour le contrôle mixte d'un bief, nous avons proposé une structure de contrôle dite « cascade en entrée », comme décrit en figure 2.13.

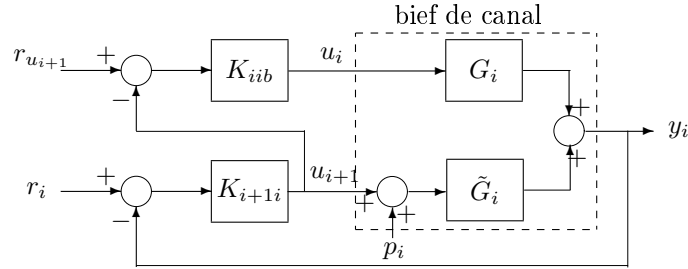


FIG. 2.13: Architecture cascade avec deux variables de contrôle (u_i, u_{i+1}) pour contrôler une sortie y_i

Ce schéma cascade réalise un mixage des contrôles amont local et aval distant, permettant au gestionnaire de choisir le compromis entre la gestion de la ressource et la performance vis-à-vis de l'utilisateur.

Le contrôleur amont local K_{i+1i} a une bande passante rapide, il agit donc principalement en hautes fréquences, tandis que le contrôleur aval distant K_{iib} est limité par le retard et agit principalement en basses fréquences. Il y a donc un découplage fréquentiel. Dans ce cas, l'objectif de contrôle est de faire en sorte que le contrôleur amont local contrôle le niveau d'eau, tandis que le contrôleur aval distant contrôle le débit. Cette structure permet de réaliser le compromis entre la performance en termes de satisfaction des usagers (contrôle du niveau d'eau) et la gestion quantitative de l'eau (adaptation du débit prélevé sur la ressource à la demande).

On peut traduire les objectifs de contrôle sous la forme d'un critère H_∞ à minimiser, qui prend également en compte les contraintes de robustesse. Un tel contrôleur H_∞ mixte a été mis en œuvre sur le canal de l'Université d'Évora au Portugal et comparé à un contrôleur aval distant. Ces résultats sont détaillés dans l'article [R13*], reproduit en annexe.

On montre ici deux résultats d'expériences effectuées sur le canal d'Évora, en prenant l'ensemble du canal comme un seul bief de 150 mètres de long. On compare un contrôleur H_∞ aval distant (figure 2.14) et un contrôleur H_∞ mixte (figure 2.15). Il faut noter le comportement général du contrôleur mixte, qui utilise la commande u_2 (le seuil situé à l'aval du bief) pour compenser le prélèvement de débit qui fait chuter le niveau aval (commande de type amont local), mais au même moment, le débit amont u_1 augmente pour compenser le prélèvement et ramener u_2 à sa valeur initiale (commande aval distant). Il y a substitution entre les deux actionneurs (amont local et aval distant), ce qui est exactement ce qu'on cherchait à réaliser.

La performance du contrôleur mixte en terme de rejet de perturbation est semblable à celle obtenue par un contrôleur amont local pur et est donc bien meilleure que celle obtenue avec le contrôleur aval distant.

Les valeurs expérimentales sont comparées à celles provenant d'une simulation avec un modèle linéaire obtenu par calcul de la fonction de transfert de Saint-Venant et approximation rationnelle à partir des pôles. On voit bien ici la remarquable capacité de prédiction du modèle de Saint-Venant linéarisé.

Contrôle PI aval distant

Il arrive parfois que la structure de contrôle soit imposée par le gestionnaire. En particulier, la méthode de contrôle aval distant est la méthode standard pour de nombreuses applications. De plus, le choix de contrôleurs simples de type PI est souvent privilégié.

Cependant, les contrôleurs PI sont souvent calés par essais-erreurs, ce qui n'est pas très satisfaisant si l'on cherche à développer une méthode générique pour le contrôle des canaux. Les premiers travaux dans ce sens [Sch97, SHD⁺99] n'ont pas abouti à une méthode suffisamment générique et robuste.

Nous avons proposé dans deux « companion papers » une méthode de réglage de contrôleurs PI robustes pour un système intégrateur retard, qui permet de :

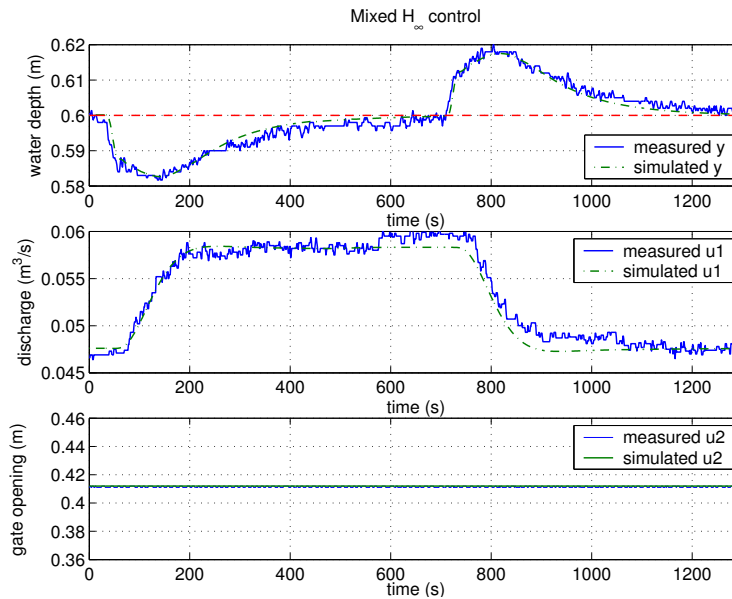


FIG. 2.14: Réponse expérimentale du contrôleur H_∞ aval distant à un prélèvement aval. Comparaison avec une simulation linéaire

- relier les performances temporelles et les marges de robustesse pour un contrôleur PI agissant sur un système intégrateur retard [R14*];
- prendre en compte des variations des paramètres du système intégrateur retard pour une performance robuste [R15*].

On obtient au final un moyen systématique de déterminer un contrôleur PI robuste pour un bief de canal représenté par un intégrateur retard, puisque l'étude est faite sur un système adimensionnel (retard et gain unitaires). Ce travail permet à un gestionnaire de déterminer simplement les paramètres d'un contrôleur PI pour un bief de canal, directement à partir des performances souhaitées pour une gamme de débits.

Cette méthode ouvre également la voie à l'intégration de la commande dans la conception et le dimensionnement des canaux. En effet, on voit que la performance des contrôleurs est directement liée à la géométrie des canaux. Dans ce cadre, une approche « amont » (sans mauvais jeu de mots) permettrait d'intégrer dès la conception d'un nouveau canal les objectifs de gestion opérationnelle. Les modèles et les contrôleurs proposés permettent tout à fait une telle intégration, qui est une perspective totalement nouvelle pour les canaux.

Calage automatique de contrôleurs PI

Pour certains canaux, il est difficile d'avoir les paramètres physiques des biefs, soit parce que la géométrie du canal a changé, soit parce que les plans ne sont plus accessibles, soit parce que le canal n'a pas une géométrie régulière. Enfin, le coefficient de Strickler n'est pas toujours bien connu pour les canaux. Dans ce cas, il est difficile d'utiliser la méthode ci-dessus qui nécessite la connaissance de paramètres physiques du bief (géométrie, débit et frottement). Il est alors possible d'utiliser une méthode de calage automatique, qui utilise une expérience de relais pour identifier les paramètres du bief et pour caler les coefficients d'un contrôleur P, PI ou PID.

Nous avons utilisé la méthode ATV (Auto Tune Variation), initialement proposée par Aström et Hagglung [AH84], pour développer une méthode de réglage de contrôleurs PI pour un système intégrateur retard. Cette méthode a été mise en œuvre sur plusieurs biefs de canal de Gignac, en conjonction avec la méthode de réglage robuste développée ci-dessus. Ce travail a donné lieu à la publication [R17*], ainsi qu'à une méthode de calage de contrôleurs utilisée par le gestionnaire du canal de Gignac.

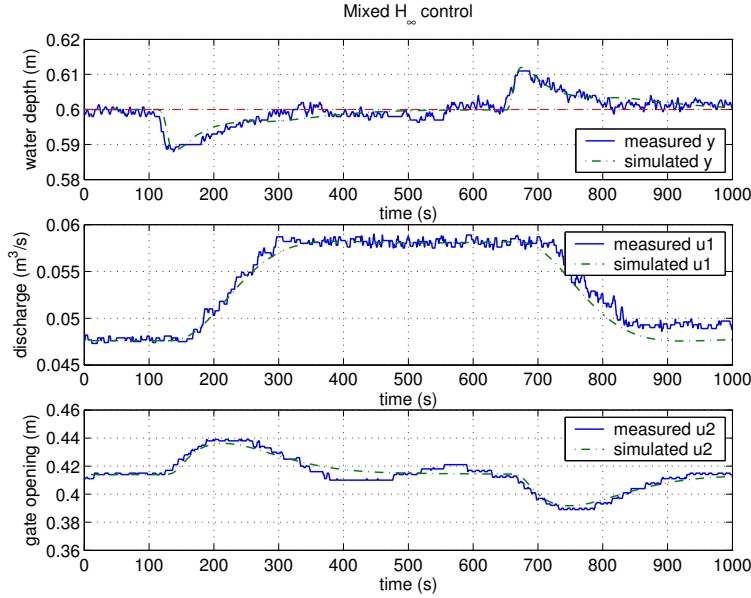


FIG. 2.15: Réponse expérimentale du contrôleur H_∞ mixte à un prélèvement aval. Comparaison avec une simulation linéaire

Contrôle frontière de l'équation de Saint-Venant linéarisée

Comme déjà évoqué à la section 2.3, selon le modèle de Saint-Venant, un bief de canal peut présenter des modes oscillants de forte amplitude. Dans ce cas, il existe des fréquences pour lesquelles le bief peut entrer en résonance. Ceci est potentiellement néfaste pour la gestion de ces canaux, aussi bien d'un point de vue de la gestion que d'un point de vue structurel (pour la stabilité des berges, il est préférable d'éviter les fortes variations de niveau et les débordements).

Nous avons proposé dans [R16*] une méthode pour contrôler à l'aide d'un contrôleur frontière de type amont local les modes d'un canal pour un écoulement uniforme. Cet article fait le lien entre l'adaptation d'impédance qui permet un contrôle exact des modes oscillants avec un contrôle frontière dynamique, l'approche par invariants de Riemann qui conduit à un contrôleur proportionnel dans le cas d'un bief horizontal sans frottements et le lieu des pôles (voir figure 2.9) qui montre qu'un contrôle frontière proportionnel permet une atténuation des modes (cf. section 2.3.3).

Ce travail est actuellement en voie d'extension au cas d'un écoulement non uniforme, pour lequel il n'y a pas d'expression analytique de la fonction de transfert. On s'appuie alors sur la méthode numérique que nous avons proposée pour démontrer quelques propriétés du système contrôlé par un contrôle frontière proportionnel. Des résultats expérimentaux prometteurs ont été obtenus sur le canal d'Évora, pour un bief de 75 m de long.

Exemple 3 (Contrôle frontière des modes oscillants) *On présente ici une expérience montrant l'effet du contrôleur frontière amont local sur le premier mode oscillant. Pour cela, le canal est excité avec une entrée sinusoïdale (débit amont $u_1 = 10 + 5\sin\omega t$ l/s), avec $\omega = 0.082$ rad/s qui correspond à la fréquence du premier mode oscillant. Pour un débit moyen de 10 l/s, la vitesse et la célérité sont données par $V_0 = 0.19$ m/s et $C_0 = 1.98$ m/s et la largeur au miroir $T_0 = 0.36$ m. Le contrôleur proportionnel est alors donné par $k_u^* = 0.78$ m²/s.*

Au début de l'expérience, il n'y a pas de contrôle, c'est à dire que le débit aval est maintenu constant $q(X) = 10$ l/s (l'actionneur est ici une vanne papillon normalement utilisée comme prise latérale sur ce canal). Puis, à $t = 1250$ s, le contrôleur proportionnel est mis en route (voir figure 2.16). Les oscillations du niveau sont très fortement réduites, aussi bien à l'aval que sur l'ensemble du bief.

Ce contrôleur permet donc bien d'atténuer le premier mode oscillant d'un écoulement dans un bief à surface libre. De plus, on verra plus loin que cette approche d'analyse et de contrôle est directement généralisable au cas des équations hyperboliques de lois de conservation (cf. [C24]).*

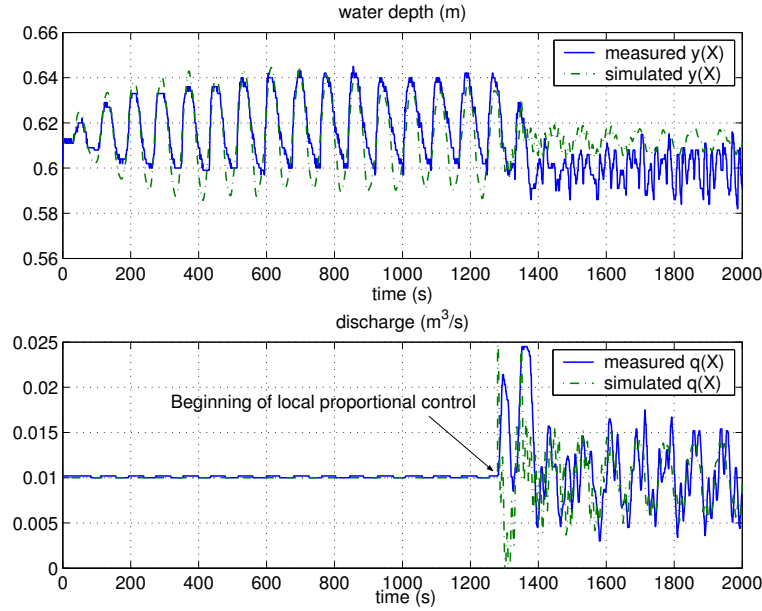


FIG. 2.16: Niveau aval $y(X)$ et débit aval $q(X)$ sans et avec le contrôleur proportionnel k_u^* . Comparaison avec une simulation linéaire

2.4.3 Contrôle d'un canal

Les trois méthodes de contrôle d'un canal multi-biefs sont décrites et analysées en détail dans [C17, C19, C20]. On y montre que les deux méthodes classiques de contrôle décentralisé pour un bief (amont local et aval distant) se généralisent directement pour un canal, en garantissant la stabilité nominale et la robustesse. Pour améliorer la performance, on utilise des reports, des éléments non diagonaux du contrôleur qui permettent d'améliorer le découplage entre biefs. En amont local comme en aval distant, on peut les calculer à partir de la description fréquentielle du système.

Enfin, le contrôleur mixte peut également se régler de manière décentralisée, ce qui en fait une structure de contrôle très intéressante pour la commande des canaux.

Nous détaillons ci-dessous le cas d'un canal à deux biefs.

Contrôle aval distant

On étudie la stabilité et la performance d'un canal à deux biefs contrôlé par l'aval distant. La structure du contrôleur est alors

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ 0 & K_{22} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

avec K_{11} et K_{22} les contrôleurs aval distant monovariables pour chaque bief et K_{12} un terme additionnel de découplage.

La boucle fermée donne la relation entre les erreurs de poursuite e_1, e_2 et les perturbations p_1, p_2 :

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{11}K_{22}M_{22} \left(1 + K_F \frac{G_1}{G_1}\right) \\ 0 & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

avec $M_{11} = -\tilde{G}_1(1+G_1K_{11})^{-1}$, $M_{22} = -\tilde{G}_2(1+G_2K_{22})^{-1}$ et $K_F = K_{12}K_{22}^{-1}$ un terme de pré-commande.

On observe que la matrice de transfert en boucle fermée est triangulaire supérieure. Donc, la stabilité du système multivariable est directement liée à celle des systèmes monovariables. De plus, les marges de robustesse sont également conservées, puisque le système est *structurellement* triangulaire supérieur (le terme M_{21} est nul, même dans le cas où le modèle est incertain). Finalement, le système multivariable est stable et robuste vis-à-vis d'incertitudes diagonales en entrée *si et seulement si* les systèmes monovariables ont les mêmes propriétés.

On peut montrer que la perturbation créée par la deuxième commande u_2 diminue la performance du système (cf. [C19]). Cette interaction entre biefs se traduit par la présence d'un élément non nul hors de la diagonale de la matrice M . L'effet de ce terme peut être diminué par un choix adéquat de $K_{12} = K_F K_{22}$. En effet, un découplage parfait est obtenu si :

$$K_F(s) = -\frac{\tilde{G}_1(s)}{G_1(s)}$$

Mais avec les transferts \tilde{G}_1 et G_1 donnés par le modèle intégrateur retard, on obtient $K_F(s) = e^{\tau_1 s}$, qui est une avance pure, ce qui n'est pas causal. On ne peut donc pas annuler le terme non diagonal.

En pratique, les ingénieurs hydrauliciens utilisent un gain constant (entre 0.5 et 1). Au vu de notre résultat, le gain devrait être égal à 1 en basses fréquences car si $K_F(j\omega) = 1$, alors $|1 - e^{-\tau_1 j\omega}| \approx 0$ pour $\omega \approx 0$ et à 0 en hautes fréquences. Un filtre passe-bas serait donc plus adapté. L'optimisation H_∞ permet d'inclure naturellement les contraintes dans la conception du contrôleur sans avoir à régler ces paramètres « à la main ».

Contrôle amont local d'un canal à deux biefs

Nous étudions à présent la stabilité et la performance d'un canal contrôlé par l'amont local. La structure du contrôleur est alors

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ K_{21} & 0 \\ K_{31} & K_{32} \end{pmatrix}$$

avec K_{21} et K_{32} les contrôleurs amont local monovariabiles pour chaque bief et K_{31} un terme additionnel de découplage.

La boucle fermée donne la relation entre les erreurs de poursuite e_1, e_2 et les perturbations p_1, p_2 :

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{21} & 0 \\ M_{21}K_{21} \left(\frac{G_2}{\tilde{G}_2} + K_F \right) & M_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

avec $M_{21} = -\tilde{G}_1(1 + \tilde{G}_1 K_{21})^{-1}$, $M_{32} = -\tilde{G}_2(1 + \tilde{G}_2 K_{32})^{-1}$ et $K_F = K_{31} K_{21}^{-1}$ un terme de pré-commande.

De façon similaire au cas aval distant, la matrice de transfert est *structurellement* triangulaire inférieure (le terme M_{12} est nul) et on a donc les résultats équivalents au cas aval : le système de contrôle est stable si et seulement si les systèmes monovariabiles sont stables et les propriétés de robustesse dans le cas SISO sont conservées dans le cas MIMO pour des incertitudes structurées diagonales en entrée.

Comme dans le cas aval distant, les interactions entre biefs diminuent la performance du système en boucle fermée. Pour obtenir un découplage exact, les éléments non diagonaux de la matrice M doivent être nuls, *i.e.* :

$$K_F(s) = -\frac{G_2(s)}{\tilde{G}_2(s)}$$

Avec les transferts \tilde{G}_1 et G_1 donnés par le modèle intégrateur retard, on obtient $K_F(s) = e^{-\tau_2 s}$. Dans cas et contrairement au cas aval distant, un découplage exact est possible de façon théorique. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes de modèle dans la conception du contrôleur, ce qui conduira à limiter la performance.

Contrôle mixte

Le contrôleur mixte est entièrement multivariable (*i.e.* la matrice K est pleine) et la fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par

$$GK = \begin{pmatrix} G_1 K_{11} + \tilde{G}_1 K_{21} & G_1 K_{12} + \tilde{G}_1 K_{22} \\ G_2 K_{21} + \tilde{G}_2 K_{31} & G_2 K_{22} + \tilde{G}_2 K_{32} \end{pmatrix}$$

Cette boucle ouverte peut être écrite comme la somme de deux contrôleurs, l'un aval distant, l'autre amont local :

$$GK = \underbrace{\begin{pmatrix} G_1 K_{11} & G_1 K_{12} + \tilde{G}_1 K_{22} \\ 0 & G_2 K_{22} \end{pmatrix}}_{\text{Aval distant}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \tilde{G}_1 K_{21} & 0 \\ G_2 K_{21} + \tilde{G}_2 K_{31} & \tilde{G}_2 K_{32} \end{pmatrix}}_{\text{Amont local}}$$

Comme on l'a vu plus haut, il est possible d'obtenir un découplage parfait avec le contrôleur amont local. Ainsi, on peut concevoir un contrôleur K_{31} tel que :

$$G_2 K_{21} + \tilde{G}_2 K_{31} = 0$$

Alors, la matrice de transfert en boucle ouverte $G(s)K(s)$ devient triangulaire supérieure :

$$G(s)K(s) = \begin{pmatrix} G_1 K_{11} + \tilde{G}_1 K_{21} & G_1 K_{12} + \tilde{G}_1 K_{22} \\ 0 & G_2 K_{22} + \tilde{G}_2 K_{32} \end{pmatrix}$$

Cette dernière expression peut être réécrite comme la mise en série du contrôleur fictif

$$\tilde{K}(s) = \begin{pmatrix} \frac{G_1}{\tilde{G}_1} K_{11} + K_{21} & \frac{G_1}{\tilde{G}_1} K_{12} + K_{22} \\ 0 & \frac{G_2}{\tilde{G}_2} K_{22} + K_{32} \end{pmatrix}$$

et du système fictif

$$\tilde{G} = \begin{pmatrix} \tilde{G}_1 & 0 \\ 0 & \tilde{G}_2 \end{pmatrix}$$

Avec ces notations, le système en boucle fermée devient :

$$\begin{aligned} y(s) &= G(s)K(s)(r(s) - y(s)) + \tilde{G}(s)p(s) \\ &= \tilde{G}(s)\tilde{K}(s)(r(s) - y(s)) + \tilde{G}(s)p(s) \end{aligned}$$

Les perturbations et les erreurs sont reliées par la relation :

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{M}_1(s) & \tilde{M}_1(s)\tilde{K}_{12}(s)\tilde{M}_2(s) \\ 0 & \tilde{M}_2(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

où $\tilde{M}_i(s)$ est donné par, pour $i = 1, 2$:

$$\tilde{M}_i(s) = (I + \tilde{G}_i \tilde{K}_{ii})^{-1} \tilde{G}_i$$

et où

$$\tilde{K}_{ij}(s) = \frac{G_i}{\tilde{G}_i} K_{ii} + K_{i+1j}$$

On obtient encore un système triangulaire supérieur, dont la stabilité nominale est directement liée à celles des contrôleurs mixtes de chaque bief. Cependant, cette matrice n'est pas *structurellement* triangulaire supérieure (car M_{21} est non nul en cas d'incertitudes de modèle), il est donc nécessaire d'évaluer la robustesse vis-à-vis d'erreurs de modèle. La robustification du système vis-à-vis d'incertitudes de modèle non diagonales conduit à contraindre K_{21} et K_{31} à filtrer les hautes fréquences. Cela reviendra à limiter la performance du découpleur amont local.

La structure de contrôle mixte est donc similaire aux structures classiques : il est possible de concevoir les contrôleurs indépendamment pour chaque bief et d'utiliser les découpleurs pour améliorer la performance. Dans le cas nominal, la matrice \tilde{M} est similaire à la matrice M obtenue dans le cas aval distant décentralisé. Cependant, dans ce cas, la performance n'est plus limitée par le temps de retard, car \tilde{G} ne contient pas de retard.

C'est le découplage fréquentiel qui assure que les marges de robustesse sont recouvrées dans le cas mixte en basses et hautes fréquences. Cependant, il est nécessaire d'évaluer la robustesse vis-à-vis d'erreurs de modèle dans les termes non diagonaux. Ceci peut être fait *a posteriori* en calculant la valeur singulière structurée μ pour des incertitudes dynamiques.

Extension au cas d'un canal à n biefs

On considère à présent l'extension de ces résultats au cas d'un canal avec plusieurs biefs.

Le contrôleur mixte peut être implémenté sous la forme d'un contrôleur multivariable centralisé. Cependant, on peut aussi utiliser sa structure particulière pour l'implémenter de façon semi-décentralisée, ce qui permet de faciliter la maintenance et la détection de défauts.

Comme on l'a vu auparavant, pour le contrôleur mixte, chaque contrôle u_i peut être décomposé comme la somme d'un contrôle amont local u_i^{al} et d'un contrôle aval distant u_i^{ad} :

$$u_i = u_i^{al} + u_i^{ad}$$

avec u_i^{al} agissant principalement en hautes fréquences et u_i^{ad} en basses fréquences. Ces contrôles sont donnés par :

$$\begin{aligned} u_i^{al} &= K_{ii-1}e_{i-1} \\ u_i^{ad} &= K_{ii}e_i \end{aligned}$$

Les éléments non diagonaux de la matrice K sont ensuite obtenus à l'aide des règles de découplage. Pour simplifier, on suppose que le découpleur aval distant est un gain constant égal à 1 et que le découpleur amont local est un retard pur, ce qui donne

$$K_{ij}(s) = K_{jj}(s) \quad \forall i < j$$

et

$$K_{ij}(s) = e^{-(\sum_{k=i-1}^{j+1} \tau_k)s} K_{j+1j}(s) \quad \forall i > j + 1$$

Ce type de contrôleur mixte semi-décentralisé est schématisé dans les figures 2.17 et 2.18.

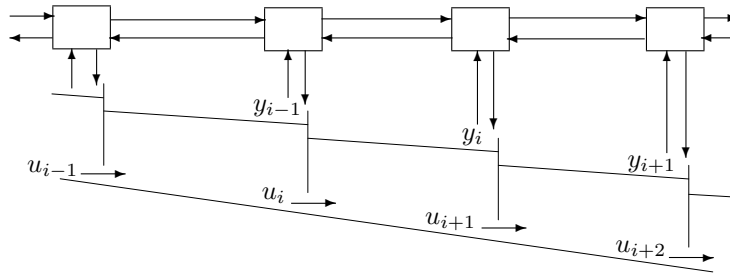


FIG. 2.17: Structure générale du contrôleur mixte semi-décentralisé

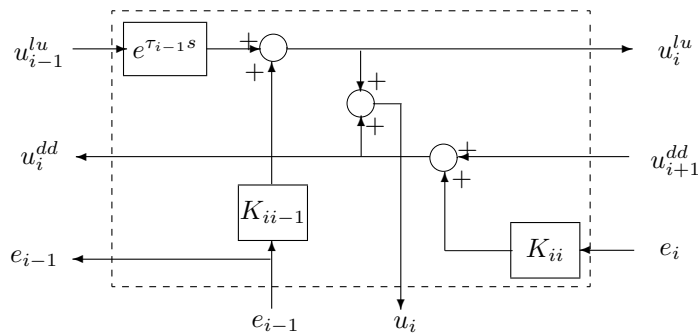


FIG. 2.18: Élément local de contrôle pour le contrôleur mixte semi-décentralisé

Ainsi, il est clair que chaque contrôleur ne communique qu'avec ses voisins directs amont et aval. Cette structure de contrôle bidiagonale présente l'avantage d'être facilement mise en œuvre et de faciliter la maintenance et la détection de défauts.

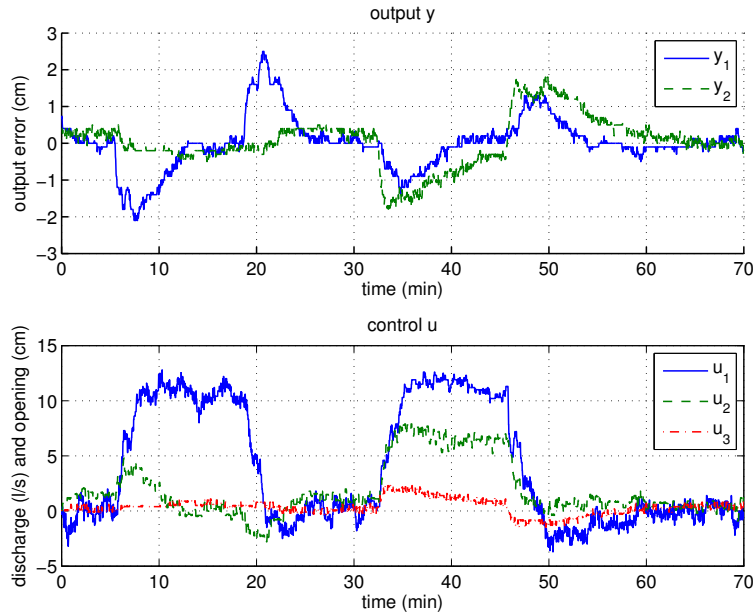


FIG. 2.19: Contrôle aval distant d'un canal à deux biefs. Réponse à un prélèvement imprévu dans le bief 1, puis dans le bief 2.

Exemple 4 (Mise en œuvre sur le canal d'Évora) *Nous illustrons les différentes approches dans le cas du canal d'Évora, en considérant 2 biefs de 75 mètres, séparés par une vanne plate. Le seuil mobile situé à la fin du canal est utilisé par les contrôleurs amont local et mixte pour contrôler la cote y_2 . Le débit initial est de 45 l/s et les cotes aval sont contrôlées autour de 60 cm. Chaque bief a un temps de retard d'environ 30 secondes.*

Contrôle aval distant *On teste la réaction du système contrôlé à un prélèvement imprévu de 10 l/s dans le premier bief au temps $t = 5$ min, puis à l'arrêt de ce prélèvement à $t = 18$ min. Un autre prélèvement imprévu a lieu dans le deuxième bief à $t = 33$ min, puis est arrêté à $t = 46$ min.*

La réaction du contrôleur aval distant est donnée en figure 2.19. A cause du temps retard, ces perturbations occasionnent un écart sur le niveau aval de 2 cm et le niveau rejoint sa consigne après environ 6 minutes, soit 12 fois le temps de retard. Cette performance est conforme avec les marges de gain et de phase choisies.

On remarque lors du premier prélèvement l'efficacité du découplage entre les biefs, qui fait que la perturbation n'affecte pas le deuxième bief. Lors du second prélèvement, le report présent entre les deux biefs fait que la cote y_1 est moins affectée par le prélèvement que la cote y_2 .

Il est cependant clair qu'une fois ces contrôleurs réglés, il n'est pas possible d'améliorer la performance vis-à-vis des usagers.

Contrôle amont local *En réponse au même scénario de perturbation que celui utilisé dans le cas aval distant, le contrôleur amont local ramène très vite la sortie à la consigne (voir la figure 2.20). L'erreur maximale est de 1 cm et la perturbation est rejetée en moins de 2 minutes. La comparaison avec la simulation dans le cas aval distant montre bien l'amélioration de la performance. Cependant, un tel contrôleur ne peut pas être utilisé pour la gestion opérationnelle d'un canal d'irrigation, car le débit amont u_1 ne s'adapte pas à la demande et toutes les perturbations sont rejetées vers l'aval.*

Contrôle mixte *Le contrôleur mixte est testé sur le même scénario de prélèvement imprévu que pour les deux contrôleurs précédents (voir figure 2.21). Il est clair que la performance temporelle est largement améliorée par rapport au cas du contrôleur aval distant. On obtient en fait une performance très similaire à celle du contrôleur amont local, mais le débit amont s'adapte bien à la demande, comme pour le contrôleur aval distant. Il y a une substitution entre u_2 , u_3 et u_1 .*

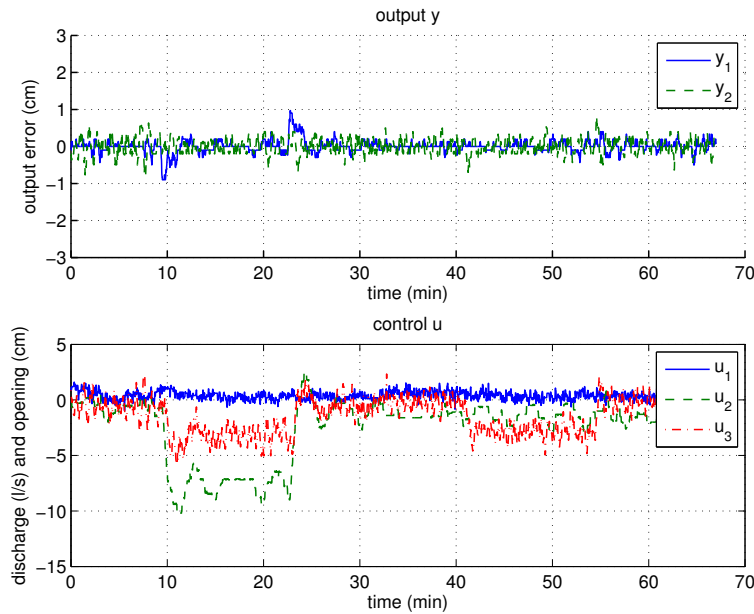


FIG. 2.20: Contrôle amont local d'un canal à deux biefs. Réponse à un prélèvement imprévu dans le bief 1, puis dans le bief 2.

Ces simulations montrent bien l'intérêt d'un contrôle mixte pour les canaux : il permet au gestionnaire de régler comme il l'entend la performance vis-à-vis de l'utilisateur, tout en garantissant que la ressource est correctement gérée par l'aval distant. On peut en effet dégrader la performance du contrôleur amont local comme spécifié par le gestionnaire, pour ne finalement n'utiliser que l'aval distant, si nécessaire.

Pour démontrer de façon plus illustrative la capacité du contrôleur mixte à effectuer le compromis nécessaire pour la gestion opérationnelle d'un canal d'irrigation, on a testé un scénario plus complexe : le bief 1 est supposé perturbé par des prélèvements de haute fréquence, mais de faible amplitude, alors que le bief 2 est perturbé par des prélèvements de basse fréquence, mais d'amplitude plus large (voir figure 2.22).

On présente l'expérience avec le contrôleur aval distant multivariable en figure 2.23. On observe que la performance est limitée par le temps de retard, qui fait que le contrôleur ne peut pas rejeter efficacement la perturbation de haute fréquence p_1 . Cependant, la perturbation basse fréquence p_2 est rejetée lentement, mais de façon efficace.

L'expérience avec le contrôleur mixte est présentée en figure 2.24. Le contrôleur amont local du bief 1 rejette la perturbation haute fréquence, mais est également capable dans le même temps de suivre la demande en eau basse fréquence du bief 2. Ceci est clairement visible lorsque la demande du bief 2 change, ce qui correspond à un changement dans le débit aval. En termes de contrôle de niveau, la performance est nettement supérieure à celle obtenue par le contrôle aval distant et le contrôleur mixte garantit que les perturbations basse fréquence sont rejetées par l'amont, comme dans le cas aval distant.

Perspectives

Les travaux réalisés sur le contrôle d'un canal d'irrigation ont été validés en simulation et par des expériences sur des canaux réels (canal laboratoire de l'ENSEEIH, canal expérimental d'Évora et canal de Gignac). Les outils développés permettent d'envisager une synthèse quasi-automatique de contrôleurs pour un canal, en fonction du compromis désiré par le gestionnaire entre la performance du service vis-à-vis des usagers (amont local) et la gestion de la ressource (aval distant).

Il reste des points à développer pour aller dans le sens d'outils de synthèse de contrôleurs pour les canaux. Je mettrais en priorité les deux points suivants :

- Contrôle mixte d'un canal avec marges de robustesse : La synthèse d'un contrôleur mixte multivariable de manière systématique demande d'étudier le lien entre les marges de robustesse mono-variables des contrôleurs mixtes de chaque bief et les marges multivariables obtenues finalement. Cela semble difficile de façon générale, mais on peut imaginer qu'une approche basée sur un modèle

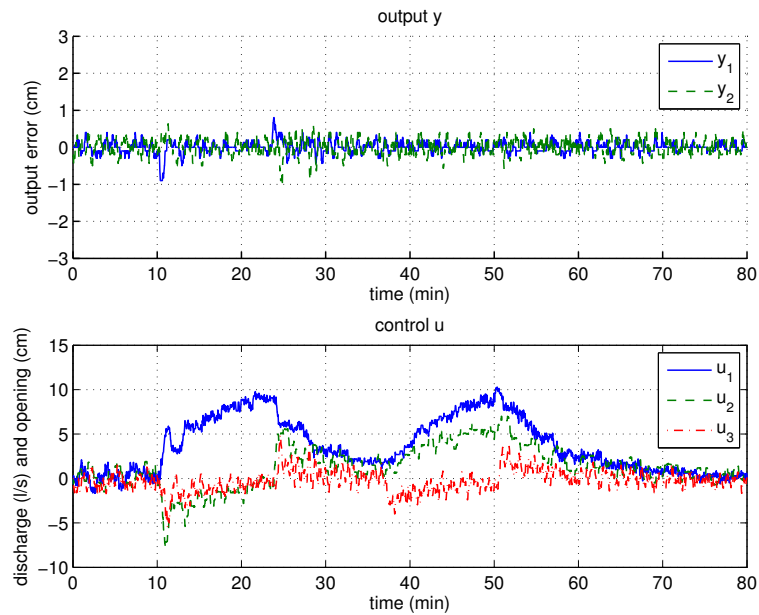


FIG. 2.21: Contrôle mixte amont local aval distant d'un canal à deux biefs. Réponse à un prélèvement imprévu dans le bief 1, puis dans le bief 2.

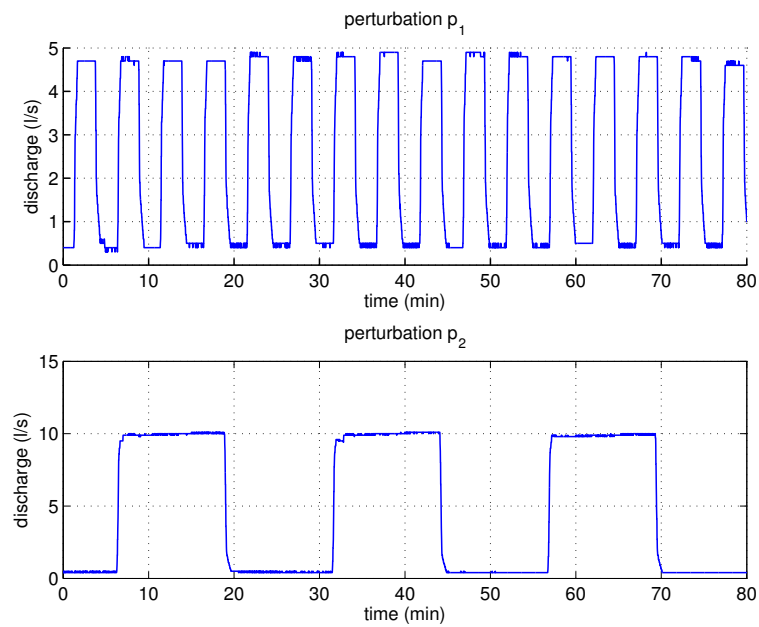


FIG. 2.22: Perturbations du bief 1 (haute fréquence, faible amplitude) et du bief 2 (basses fréquence, grande amplitude).

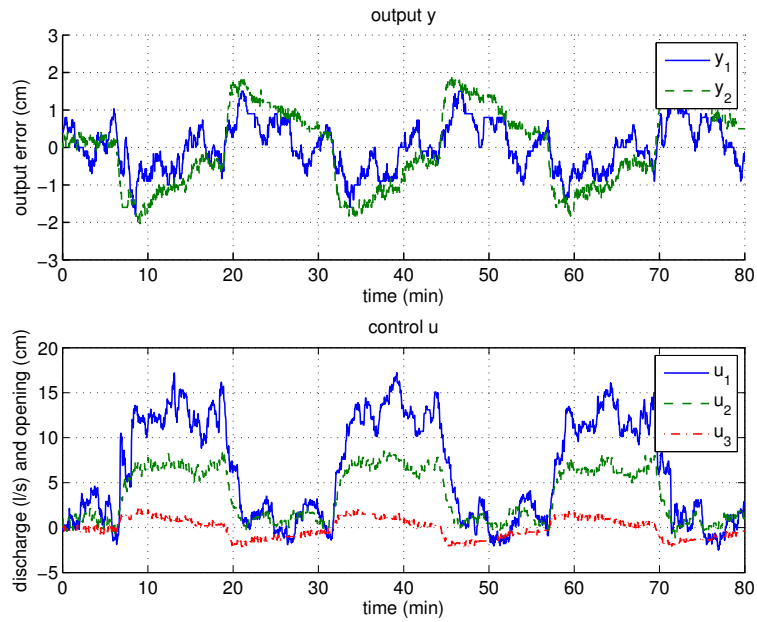


FIG. 2.23: Contrôle aval distant d'un canal à deux biefs. Réponse à une perturbation de haute fréquence dans le bief 1 et de basse fréquence dans le bief 2.

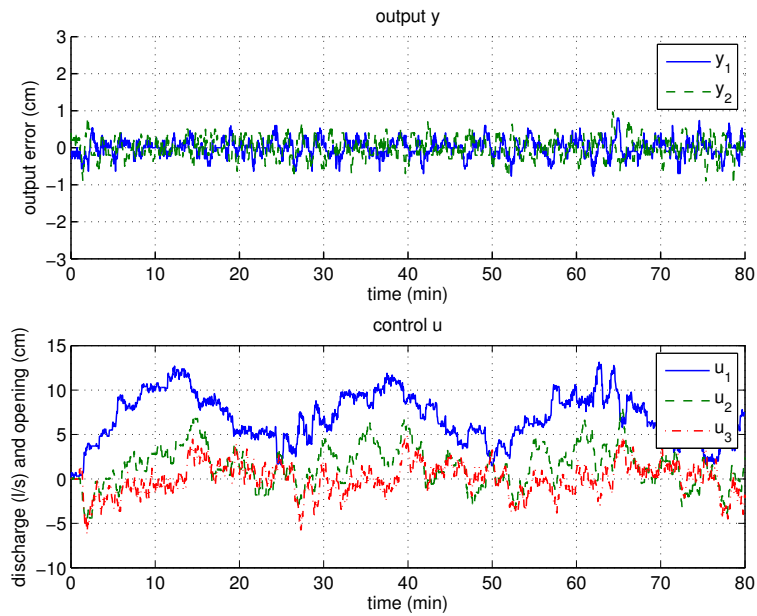


FIG. 2.24: Contrôle mixte amont local aval distant d'un canal à deux biefs. Réponse à une perturbation de haute fréquence dans le bief 1 et de basse fréquence dans le bief 2.

intégrateur retard permette d'obtenir des résultats pour un réglage initial.

- Calage automatique de contrôleurs PI mixtes pour un canal : Dans une perspective d'application pour la synthèse de contrôleurs pour un canal, il serait intéressant d'étendre la méthode de calage automatique de contrôleurs PI pour un bief au cas d'un canal multi-biefs. Dans ce cas, il est nécessaire de calculer les reports pour le contrôle en aval distant, si possible directement à partir de l'expérience du relais. Ce travail est actuellement en cours de développement.

2.5 Supervision des canaux

Le contenu de cette section est directement lié au travail de Nadia Bedjaoui (voir thèses co-encadrées), qui termine sa thèse sur ce sujet en décembre 2006. Seuls les points saillants de ce travail seront présentés.

Comme tout système contrôlé, un canal contrôlé de façon automatique (ou même simplement téléopéré) utilise des données qui proviennent de capteurs qui sont susceptibles de tomber en panne, ou bien de donner une information biaisée. De même, les actionneurs mécaniques utilisés (vannes ou seuils motorisés, pompes) peuvent également être sujets à des pannes ou des défauts. Toutes ces données sont centralisées sur un poste de contrôle qui permet la gestion à distance du système.

Le gestionnaire dispose donc d'un grand nombre de données sur son système, qui peuvent être utilisées à la fois pour la gestion quotidienne et pour la supervision. Dans ce cas, on peut utiliser ces données et un modèle du canal pour valider ou invalider les données et détecter la présence de défauts, voire les localiser si possible.

L'objet de la thèse de Nadia Bedjaoui était de développer des méthodes génériques pour la réconciliation de données et pour la détection de défauts dans le cas d'un canal d'irrigation.

Réconciliation de données

La gestion d'un grand nombre de données est difficile pour un gestionnaire de canal. En particulier, il lui serait très utile de disposer d'un outil permettant de détecter et localiser un capteur ou un actionneur défaillant. Un premier pas dans cette direction est d'utiliser un ou plusieurs modèles du système pour valider ou invalider les mesures.

Cette réconciliation de données se fait en deux étapes : on génère d'abord des résidus à partir du modèle et des données, puis on vérifie à l'aide de tests statistiques si ces résidus sont suffisamment faibles pour que les données puissent être validées. Sinon, on déclenche une alarme pour avertir le gestionnaire qu'un problème significatif a eu lieu en un point donné du canal.

Ce travail a été effectué localement avec des modèles statiques : la réconciliation permet alors de valider ou d'invalider des données à une vanne (ouverture, niveaux amont et aval, débit). Nous avons en particulier mis en évidence la dérive d'un modèle dit de « courbe de tarage » qui relie localement le niveau d'eau au débit. Comme des algues poussent dans le canal de Gignac (utilisé pour le test des méthodes), le frottement change au cours de la saison et la relation hauteur-débit de début de saison n'est plus valide en fin de saison.

Cette méthode de réconciliation de données a ensuite été étendue au cas d'un modèle dynamique (on obtient alors le fameux filtre de Kalman) [C23]. Un article de revue basé sur ces travaux est en cours de rédaction.

Détection de défauts

Pour la détection de défauts, nous avons également développé en collaboration avec Damien Koenig une approche basée sur l'utilisation d'observateurs pour les systèmes à retard. Comme le bief est un système à retard et que la discrétisation du retard mène à des systèmes de grandes dimensions, nous avons voulu prendre en compte de façon explicite le retard du bief dans la conception des observateurs.

Ceci nous a amené à proposer des observateurs à entrées inconnues pour les systèmes à retards dans l'état et la commande (voir [C21]). Ce travail a ensuite été étendu avec la conception d'observateurs à entrées inconnues robustes pour le même type de systèmes (voir [C26]). Enfin, nous préparons un article sur la conception d'observateurs robustes pour la détection et l'isolation de défauts pour un système à retards.

Perspectives

Ces techniques de réconciliation de données me semblent avoir un bel avenir dans les applications liées à la gestion de l'eau en général. En particulier, il existe de nombreuses données qu'on peut à présent obtenir via les satellites de télédétection [Rou04]. Ce type de données est très intéressant dans le cas des grands fleuves pour lesquels les données de terrain sont difficiles à collecter. Ces techniques peuvent être utilisées pour le calage, l'identification et la validation de modèles hydrauliques utilisés pour la gestion.

2.6 Conclusions et perspectives

2.6.1 Conclusions

Les travaux présentés ici ont donc répondu à la fois à des questions pratiques posées par les gestionnaires de canaux et à des questions plus théoriques qui étaient sous-jacentes dans les publications scientifiques du domaine, à la fois en hydraulique et en automatique.

En modélisation, nous avons montré l'intérêt d'une approche fréquentielle pour la modélisation de l'écoulement dans les canaux, des ouvrages hydrauliques et de l'interaction entre l'écoulement et les ouvrages. Dans notre cas, cette approche nous a permis d'analyser en détail la dynamique de l'écoulement de l'eau dans un canal à surface libre, représenté par les équations de Saint-Venant. Nous avons montré que l'écoulement le plus réaliste (non uniforme) avait un comportement dynamique qualitativement similaire à un écoulement uniforme (intégrateur, retard, modes oscillants). Nous avons proposé un modèle simplifié qui représente de façon approchée l'écoulement en basses et hautes fréquences.

L'approche fréquentielle permet d'analyser finement l'interaction entre l'écoulement et les ouvrages hydrauliques, qu'ils soient statiques ou dynamiques. L'utilisation conjointe du modèle simplifié et de la linéarisation des ouvrages permet d'avoir une très bonne approximation dynamique du débit à une vanne, ce qui est utile pour l'inversion de la vanne lorsqu'on contrôle en débit.

La modélisation des ouvrages hydrauliques est également une contribution de notre travail, en particulier les ouvrages hydromécaniques à niveau amont constant (vannes Begemann et Vlugter).

Concernant le contrôle des canaux, nos contributions sont de deux types :

- Méthodologique : nous avons analysé les méthodes classiques en fonction des contraintes de gestion, formalisé un cahier des charges et proposé une méthode mixte pour concevoir un contrôleur réalisant le compromis désiré ;
- Technique : nous avons proposé une méthode de calage de contrôleurs PI robustes à partir d'un modèle simple du bief, ainsi qu'une méthode de calage automatique dans le cas où les paramètres du modèle ne sont pas connus. Enfin, la méthode mixte permet de concevoir un contrôleur multivariable à partir de raisonnements monovariabiles.

La vision fréquentielle est encore ici très fructueuse, aussi bien pour la synthèse de contrôleurs PI, pour l'analyse de la méthode ATV que pour l'analyse des structures de contrôle d'un canal.

Au final, l'approche choisie est à « mi-chemin » : à mi-chemin entre l'application et la théorie, à mi-chemin entre l'automatique et l'hydraulique et à mi-chemin entre la recherche et l'ingénierie. Les perspectives de recherche sont à la fois théoriques et appliquées, puisqu'on obtient des outils intéressants à la fois le chercheur, le gestionnaire de canaux et même l'ingénieur en génie civil concevant de nouveaux canaux. Ces résultats, publiés dans des revues d'automatique et d'hydraulique, sont jugés intéressants par les deux communautés. Les méthodes ont été appliquées sur plusieurs canaux réels, ce qui montre leur intérêt pratique. Pour que ces outils soient utiles aux ingénieurs et gestionnaires à qui ils s'adressent au premier chef, une politique volontariste de transfert est nécessaire. Cela passe entre autres par des collaborations de long terme, comme celle que j'ai contribué à monter avec la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, ou auxquelles je participe avec le canal de Gignac et la Société du Canal de Provence.

2.6.2 Perspectives

Pour finir, je voudrais proposer un certain nombre de pistes de recherche, dans plusieurs directions. Ces pistes ne seront peut-être pas toutes complètement explorées, mais à mon sens elles méritent une attention, chacune pour des raisons différentes. On retrouve ici les chemins déjà explorés dans ma démarche de

recherche : des aspects théoriques, des aspects plus pratiques et enfin une troisième piste, qui concerne d'autres systèmes que les canaux d'irrigation.

Vers la théorie

Le fait de s'intéresser à des problèmes de gestion n'interdit pas de considérer également des aspects plus théoriques. Dans la suite de nos résultats sur le contrôle des modes de l'équation de Saint-Venant linéarisée, nous avons considéré de façon plus générale l'application d'une approche fréquentielle au contrôle frontière des systèmes hyperboliques linéaires de lois de conservation. On s'éloigne alors du problème de gestion des canaux et on se rapproche du problème du garçon de café... Nous avons développé cette approche dans deux communications récentes [C24*] et [C25]. Nous avons montré que les systèmes considérés appartenaient à une algèbre de fonctions de transfert de dimension infinie [CD78, CW92] et que la stabilité entrée-sortie impliquait la stabilité interne [C24*]. Enfin, nous avons utilisé une approche fréquentielle pour le contrôle en boucle ouverte d'un tel système pour des perturbations à la frontière du système [C25]. Ces résultats ont confirmé l'intérêt de cette approche pour des systèmes plus généraux que les canaux à surface libre et peuvent être étendus pour montrer la stabilité du système de dimension infinie non linéaire autour de la linéarisation considérée.

Un autre aspect est la prise en compte de l'aspect non linéaire, soit pour concevoir des contrôleurs non linéaires, soit pour prendre en compte la dynamique non linéaire du bief. Les contrôleurs linéaires sont rarement utilisés tels quels dans la réalité : il existe toujours des saturations ou des limiteurs de vitesse, qui rendent le système de contrôle non linéaire. Il est donc intéressant de considérer ces éléments pour l'analyse de la stabilité et de la robustesse. De plus, une stratégie de contrôle non linéaire peut être intéressante pour les canaux : on pourrait gérer l'eau différemment suivant qu'on est en manque (par exemple lorsque le niveau est inférieur à la consigne) ou en surplus (niveau supérieur à la consigne). On pourrait également agir différemment selon que l'on est loin ou proche de la consigne de niveau (ou de débit). Ce type de stratégie est typiquement non linéaire et nécessite une analyse de stabilité et de robustesse avec des outils différents des outils de l'automatique fréquentielle linéaire. Il serait intéressant d'utiliser les outils développés par Vincent Fromion et Gérard Scorletti pour l'analyse de la robustesse de systèmes non linéaires incrémentaux (le μ_{NL} , voir [Fro95]). Cette possibilité a été testée lors d'un stage de DEA sur le contrôle non linéaire d'un canal, mais cette piste mérite d'être plus profondément explorée.

Le caractère non linéaire de la dynamique du bief est également important à prendre en compte. J'ai proposé une première approche lors de mon post-doctorat à l'INRIA Sophia-Antipolis, avec le développement et l'utilisation pour le contrôle d'un modèle non linéaire simplifié pour les rivières [C14]. Cette approche pourrait être généralisée au cas d'un bief de canal, en prenant en compte la courbe de remous. Enfin, en perspective plus lointaine, car il n'y a que très peu de travaux dans ce domaine, la conception de contrôleurs pour les équations de Saint-Venant complètes reste un enjeu de taille, puisqu'on cumule alors les difficultés liées à l'aspect dimension infinie et à l'aspect non linéaire.

Vers l'application

Lorsqu'on réalise des expériences sur plusieurs canaux, on se rend vite compte que la réalité est souvent loin de la simulation numérique. Il faut en effet fréquemment corriger un problème de capteur, d'actionneur, ou de communication avant de pouvoir réaliser un test correct. Ces aspects très pratiques de mise en œuvre doivent être pris en compte pour faciliter une large diffusion des méthodes de contrôle des canaux. En particulier, il me semble qu'après les aspects de détection de défaut, le problème de la reconfiguration de contrôleurs doit être étudié prioritairement, pour prolonger le travail de thèse de Nadia Bedjaoui.

D'autre part, la mise en œuvre de contrôleurs en général s'accompagne de gestion complexe d'un grand nombre de données. Comme on l'a vu, on dispose également de modèles précis pour le système contrôlé. Cependant, le système peut changer au cours du temps, soit à cause d'événements imprévus (on peut alors utiliser les méthodes de détection de défauts), soit parce que les paramètres du modèle évoluent. Dans ce cas, on peut utiliser les méthodes d'assimilation de données. L'assimilation de données est une méthode plus générale que la réconciliation, qui utilise les données nouvellement acquises pour recalibrer le modèle, soit pour identifier un nouvel état initial, soit pour modifier des paramètres du modèle. Ce type de méthode est largement développé pour les modèles météorologiques. L'application de ces techniques aux systèmes hydrauliques semble une voie prometteuse.

Enfin, si la problématique actuelle est plutôt du côté de la modernisation de la gestion des canaux que du côté de la conception de nouveaux canaux d'irrigation, les méthodes développées dans ce mémoire ouvrent la voie à un intégration des objectifs de gestion opérationnelle dans le dimensionnement des canaux. Ceci peut également être utile pour la modernisation de canaux, pour déterminer par exemple à quel endroit construire de nouveaux réservoirs et de quelle taille. Cet aspect lié au dimensionnement est à ma connaissance très peu abordé dans la littérature scientifique.

Vers d'autres horizons

Après ce tour d'horizon centré sur les canaux d'irrigation, j'envisage à présent de travailler sur d'autres systèmes que les canaux ou les rivières et de prendre en compte d'autres problématiques (qualité de l'eau, gestion de crues, etc.).

En premier lieu, la gestion de systèmes hydrauliques (canaux ou de rivières) demandera à l'avenir de prendre en compte le bassin versant en général et pas seulement du canal ou de la rivière à contrôler. En vue de l'application de la directive cadre européenne sur l'eau, les gestionnaires doivent prendre en compte des aspects plus vastes que leur système irrigué. En particulier, ils doivent intégrer le milieu naturel dans leur gestion. Pour cela, ils ont besoin d'outils d'aide à la gestion, pour estimer l'état du système hydrographique, analyser sa dynamique et prédire son comportement. Alors, le modélisateur ne peut se contenter d'utiliser des modèles de transport de l'eau dans des rivières, il doit prendre en compte des modèles hydrologiques (qui transforment la pluie en débit), voire des modèles de nappe (qui représentent les écoulements souterrains), ainsi que des modèles de consommation de l'eau. Ce travail sera le cœur de la thèse de Simon Munier, sur la modélisation intégrée des bassins versants anthropisés pour l'identification de la dynamique des rivières.

En second lieu, je pense travailler dans le sens d'une intégration des gestions quantitative et qualitative de l'eau. Les problèmes que j'ai considérés jusqu'à présent concernent la gestion quantitative de l'eau. Cependant, le contexte européen incite de plus en plus les gestionnaires (et donc les chercheurs qui essaient de résoudre des problèmes de gestion) à prendre en compte la qualité de l'eau. La directive cadre européenne sur l'eau a pour objectif que les masses d'eau atteignent un bon état écologique d'ici 2015, qui peut être traduit en termes d'indicateurs biologiques (poissons, algues, invertébrés). Après discussions avec des gestionnaires de canaux de transport d'eau brute (pour l'irrigation principalement, mais pas uniquement), il s'est avéré que les micro-algues étaient un problème important à leurs yeux. En effet, les algues considérées s'accrochent sur les parois du canal et s'agglomèrent, formant des amas qui peuvent ensuite boucher les dégrilleurs, les filtres et les systèmes de micro-irrigation (goutte-à-goutte notamment). Actuellement, il existe des moyens chimiques pour lutter contre ces algues, mais qui sont néfastes pour l'environnement. Cependant, il semble possible d'agir sur ces algues par la gestion hydraulique. En accélérant l'écoulement, on peut les décrocher et nettoyer ainsi régulièrement le canal. Il faut alors évaluer la fréquence et l'amplitude de ces lâchures pour évacuer le maximum d'algues tout en utilisant le moins d'eau possible. Ce travail fait partie d'un projet de recherche financé par l'ANR, qui vise à modéliser la qualité de l'eau (algues, sédiments, pollution ponctuelle) et à évaluer les possibilités de contrôle de la qualité par la gestion hydraulique.

Enfin, les méthodes développées ici peuvent être adaptées avec profit à d'autres systèmes hydrauliques. La gestion des eaux usées en milieu urbain est assez différente des problématiques des canaux d'irrigation, mais les deux domaines présentent tout de même de fortes similarités : l'écoulement de l'eau dans les réseaux d'assainissement s'effectue à surface libre, il est généralement représenté par les équations de Saint-Venant et les moyens d'action sont des vannes, qui découpent le système en biefs. Cependant, contrairement aux canaux, le réseau est ramifié, les écoulements sont souvent torrentiels et il ne s'agit plus ici de gérer un manque d'eau mais d'éviter les débordements lors d'épisodes pluvieux. Le sujet de recherche est donc proche en termes de modélisation mais les objectifs de contrôle sont différents. Il faut de plus intégrer des contraintes liées au temps réel pour la prévision des pluies, utiliser des modèles hydrologiques pour le milieu urbain. Ce thème de recherche sera sans doute développé à plus long terme.

Bibliographie

- [AH84] K.J. Aström and T. Hägglung. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Automatica*, 20(5) :645–651, 1984.
- [ASC93] ASCE. Unsteady-flow modeling of irrigation canals. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 119(4) :615–630, July/August 1993.
- [ASC98] ASCE. Special issue on canal automation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(1), 1998.
- [Bal85] O.S. Balogun. *Design of real-time feedback control for canal systems using linear quadratic regulator theory*. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California at Davis, 1985. 230 pp.
- [BC99] E. Bautista and A. J. Clemmens. Response of ASCE task committee test cases to open-loop control measures. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125(4) :179–188, July/August 1999.
- [BdSV71] 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 Acad. Sci. Paris*, 73 :148–154, 237–240, 1871.
- [BS97] J.-P. Baume and J. Sau. Study of irrigation canal dynamics for control purposes. In *Int. Workshop on the Regulation of Irrigation Canals, RIC’97*, pages 3–12, Marrakech, Morocco, 1997.
- [BSM98] J.-P. Baume, J. Sau, and P.-O. Malaterre. Modeling of irrigation channel dynamics for controller design. In *Conf. on Systems, Man and Cybernetics, SMC’98*, pages 3856–3861, San Diego, 1998.
- [CD78] F.M. Callier and C.A. Desoer. An algebra of transfer functions for distributed linear time-invariant systems. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, CAS-25(9) :651–662, 1978.
- [CFSU82] G. Corrigan, A. Fanni, S. Sanna, and G. Usai. A constant-volume control method for open channel operation. *International J. of Modelling and Simulation*, 2(2) :108–112, 1982.
- [CHV80] J.A. Cunge, F.M. Holly, and A. Verwey. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- [CKGS98] A. J. Clemmens, T. F. Kacerek, B. Grawitz, and W. Schuurmans. Test cases for canal control algorithms. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(1) :23–30, January/February 1998.
- [CPSU79] G. Corrigan, F. Patta, S. Sanna, and G. Usai. A mathematical model for open-channel networks. *Appl. Math. Modelling*, 3 :51–54, 1979.
- [CSU80] G. Corrigan, S. Sanna, and G. Usai. Frequency response and dynamic behaviour of canal networks with self-levelling gates. *Applied Mathematical Modelling*, 4 :125–129, 1980.
- [Cun69] J.A. Cunge. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *J. of Hydraulic Research*, 7(2) :205–230, 1969.
- [CW92] F. M. Callier and J. Winkin. *Analysis and Optimization of Systems : State and Frequency Domain Approaches for Infinite Dimensional Systems*, volume 185 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, chapter Infinite dimensional system transfer functions, pages 72–101. Springer-Verlag, New York, 1992.
- [CW04] A. J. Clemmens and B.T. Wahlin. Simple optimal downstream feedback canal controllers : ASCE test case results. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130(1) :35–46, Feb. 2004.
- [dHPC⁺03] J. de Halleux, C. Prieur, J.-M. Coron, B. d’Andréa Novel, and G. Bastin. Boundary feedback control in networks of open-channels. *Automatica*, 39 :1365–1376, 2003.

- [DLM86] B. De Leon Mojarro. *Contribution à l'amélioration de la gestion des périmètres irrigués*. Ph.D. thesis, USTL Montpellier, 1986. 137 p.
- [DS98] J.-L. Deltour and F. Sanfilippo. Introduction of Smith predictor into dynamic regulation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(4) :47–52, January/February 1998.
- [Dul01] J.-F. Dulhoste. *Contribution à la commande non linéaire de systèmes d'irrigation*. PhD thesis, INPG, Grenoble, 2001.
- [ECC99] *European Control Conference, Special Session on Canal Modelling and Control*, Karlsruhe, 1999.
- [Erm92] Y. Ermolin. Study of open-channel dynamics as controlled process. *J. Hydraul. Eng.*, 118(1) :59–71, 1992.
- [Fro95] V. Fromion. *Une approche incrémentale de la robustesse non linéaire ; application au domaine de l'aéronautique*. Ph.D. thesis, Université Paris XI Orsay, 1995.
- [FS03] V. Fromion and G. Scorletti. A theoretical framework for gain scheduling. *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, 13 :951–982, 2003.
- [HK93] P. Hurand and P. Kosuth. Régulations en rivière. *La Houille Blanche*, 2/3 :143–149, 1993.
- [LFM+98] F. Liu, J. Feyen, P.-O. Malaterre, J.-P. Baume, and P. Kosuth. Development and evaluation of canal automation algorithm CLIS. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(1) :40–46, January/February 1998. ISSN 0733-9437.
- [Mal94] P.-O. Malaterre. *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation*. Ph.D. thesis, ENGREF - Cemagref, 1994.
- [Mal98] P.-O. Malaterre. Pilote : linear quadratic optimal controller for irrigation canals. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(4) :187–194, July/August 1998.
- [MRS98] P.-O. Malaterre, D. C. Rogers, and J. Schuurmans. Classification of canal control algorithms. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(1) :3–10, January/February 1998.
- [PBW94] H. Plusquellec, C. Burt, and H.W. Wolter. Modern water control in irrigation. Technical Report 246, World Bank, Irrigation and Drainage Series, 1994.
- [PWB05] C. Prieur, J. Winkin, and G. Bastin. Boundary control of non-homogeneous systems of two conservation laws. In *44th Conf. on Decision and Control*, pages 1899–1904, Sevilla, 2005.
- [RCB87] D. Rogier, C. Coeuret, and J. Brémond. Dynamic regulation on the Canal de Provence. *Proceedings of a symposium ASCE, Portland*, pages 180–200, 1987.
- [RIC97] International workshop regulation of irrigation canals : state of the art of research and applications. Ric'97 proceedings, Marrakech-Morocco, Avril 22-24 1997.
- [Rou04] H. Roux. *Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne*. PhD thesis, INP Toulouse, 2004.
- [SCD+99] J. Schuurmans, A. J. Clemmens, S. Dijkstra, A. Hof, and R. Brouwer. Modeling of irrigation and drainage canals for controller design. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125(6) :338–344, December 1999.
- [Sch97] J. Schuurmans. *Control of water levels in open-channels*. Ph.D. thesis, ISBN 90-9010995-1, Delft University of Technology, 1997.
- [SHD+99] J. Schuurmans, A. Hof, S. Dijkstra, O. H. Bosgra, and R. Brouwer. Simple water level controller for irrigation and drainage canals. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125(4) :189–195, July 1999.
- [SMC98] *IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, San Diego, 1998. pp. 3850-3920.
- [Vlu40] H. Vlugter. Over zelfwerkende peilregelaars bij den waterstaat in nederlandsch-indie. *De ingenieur in Nederlandsch-Indie*, (6) :84–93, 1940. (in Dutch).
- [Wey01] E. Weyer. System identification of an open water channel. *Control Engineering Practice*, 9 :1289–1299, 2001.

Chapitre 3

Sélection de publications

- [R8*] X. Litrico, V. Fromion, 2004, Frequency modeling of open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, pp. 806-815.
- [R9*] X. Litrico, V. Fromion, 2004, Analytical approximation of open-channel flow for controller design, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 28, No. 7, pp. 677-695.
- [R11*] X. Litrico, G. Belaud, J.-P. Baume, J. Ribot-Bruno, 2005, Hydraulic modelling of an automatic upstream water level control gate, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 176-189.
- [R16*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, Boundary control of linearized Saint-Venant equations oscillating modes, *Automatica*, Vol. 42, Issue 6, June 2006, pp. 967-972.
- [R13*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, H_∞ control of an irrigation canal pool with a mixed control politics, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14/1, pp. 99-111.
- [R12*] X. Litrico, V. Fromion, J.-P. Baume, C. Arranja, M. Rijo, 2005, Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations, *Control Engineering Practice*, Vol. 13, No. 11, pp. 1425-1437.
- [R14*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool : (I) Theory, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 4, pp. 359-368.
- [R15*] X. Litrico, V. Fromion, J.-P. Baume, 2006, Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool : (II) Implementation issues, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 4, pp. 369-379.
- [R17*] X. Litrico, P.-O. Malaterre, J.-P. Baume, P.-Y. Vion, J. Ribot-Bruno, 2007, Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 133, No. 1, in press.
- [C24*] X. Litrico, V. Fromion, 2006, Boundary control of hyperbolic conservation laws with a frequency domain approach, *45th Conference on Decision and Control*, San Diego.

