

Le contrôle automatique des canaux d'irrigation : état de l'art et perspectives

Pierre-Olivier Malaterre[†]

[†] TR Transcan, UR Irrigation, Cemagref, 361 rue J-F. Breton, BP 5095, 34033 Montpellier cedex 1
pom@montpellier.cemagref.fr

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

MOTS-CLÉS : Automatique ; Régulation des canaux ; Gestion de ressources ; Hydraulique ; Irrigation ; Synthèse bibliographique

1. MODÉLISATION

Un canal d'irrigation est un système hydraulique à surface libre, dont l'objectif est principalement de transmettre de l'eau de sa source amont (le barrage, la rivière) à ses utilisateurs finaux aval (des agriculteurs). Des structures en travers (principalement des vannes) sont manoeuvrées pour contrôler les niveaux d'eau, des débits et/ou des volumes le long de ce canal (Fig. 1).

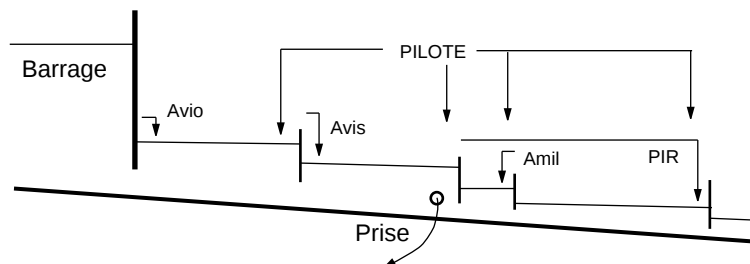


FIG. 1. Canal d'irrigation avec des ouvrages en travers et quelques exemples de régulateurs

Comme cela a été évoqué dans les présentations précédentes, le choix de la régulation d'un canal d'irrigation ne se limite pas au choix des variables à contrôler ni à celui d'un algorithme mathématique. Par exemple, le choix de la logique de contrôle (à flux tirés = commande par l'aval ou à flux poussés = commande par l'amont) est un choix très important qui a un lien très fort avec la méthode de distribution de l'eau (à la demande ou au tour d'eau). Ce choix

est également en relation directe avec le choix des variables de contrôle et des variables à contrôler. Ce choix, à son tour, a un impact important sur les modèles dynamiques sous-jacents et sur leurs caractéristiques (dynamique lente ou rapide, avec ou sans retard, modes oscillants ou non, etc.). Dans cet article nous ne détaillerons pas ces choix ni leurs implications d'un point de vue hydraulique ou automatique. Nous supposerons que ce choix est fait et qu'il s'agit maintenant de réguler certaines variables contrôlées "Z" à partir de certaines variables de commande "U", en présence de perturbations "W" et à l'aide de mesures "Y". Pour faire cela il faut un modèle de la dynamique reliant les "U" et les "Z" (et éventuellement les "W" et les "Y"), et il faut faire la synthèse d'un contrôleur qui remplisse le cahier des charges. Pour les modèles, nous distinguerons les "modèles de simulation" qui sont des modèles les plus complets possibles (réalisables) et qui servent à valider les algorithmes de contrôle en l'absence de site réel, ou en phase de validation préliminaire, et les "modèles pour la commande" qui sont des modèles simplifiés directement utilisables pour synthétiser le contrôleur. Ce découpage peut paraître un peu artificiel dans la mesure où la frontière n'est pas rigoureusement définie, mais il permet de clarifier le propos.

1.1. Modèles de Simulation

La dynamique physique des systèmes hydrauliques à surface libre tels que les canaux d'irrigation peut être correctement approchée par les équations de Saint-Venant [SAI 71] qui sont des équations hyperboliques aux dérivées partielles non-linéaires (modèle distribué), combinées avec des équations d'ouvrages en travers algébriques non-linéaires. Ces équations sont :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/S}{\partial x} + gS \frac{\partial Y}{\partial x} = gS(I - J) \quad (2)$$

avec $S(x, t)$ la section mouillée (m^2), $Q(x, t)$ le débit (m^3/s) à travers la section S , $Y(x, t)$ la hauteur d'eau (m), $J(Q, Y, x) = n^2 Q^2 S^2 R^{\frac{4}{3}}$ la pente de frottement (n = coefficient de Manning, R = rayon hydraulique (m)), t le temps (s), x l'abscisse longitudinale (m) dans la direction de l'écoulement et g l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

Ces équations doivent être complétées par des conditions à la limite externes (par exemple $Q(0, t) = Q_0(t)$, et $Q(X, t) = Q_X(t)$ ou $Y(X, t) = Y_X(t)$, où X est la longueur du canal considéré) et internes (aux ouvrages en travers), où les équations de Saint-Venant ne sont pas valides et par des conditions initiales $Q(x, 0)$ et $Y(x, 0)$ pour $x \in [0, X]$. Selon le type d'ouvrage en travers et les conditions hydrauliques, ces équations peuvent avoir des formes différentes :

- Seuil - Dénoyée : $Q = C_{sd} L \sqrt{2g} h_1^{\frac{3}{2}}$
- Seuil - Noyée : $Q = C_{sn} L \sqrt{2g} \sqrt{h_1 - h_2} h_2$
- Vanne - Dénoyée : $Q = C_{vd} L w \sqrt{2g} \sqrt{h_1 - \frac{w}{2}}$
- Vanne - Noyée : $Q = C_{vn} L w \sqrt{2g} \sqrt{h_1 - h_2}$

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

Ces équations individuelles ne sont pas suffisantes, puisqu'un ouvrage peut, pendant sa manoeuvre, changer d'une condition hydraulique à une autre. Des lois de transition continues entre les conditions hydrauliques sont nécessaires pour avoir un simulateur réaliste [MAL 97b], [MAL 97a].

Les équations de Saint-Venant n'ont pas de solution analytique connue en géométrie réelle. Dans quelques cas simples (pente nulle, sans frottements, section rectangulaire constante), la méthode des caractéristiques peut fournir une solution analytique exacte. Mais, pour des simulations sur des systèmes réels, ces équations doivent être résolues numériquement. Plusieurs schémas numériques aux différences finies, explicite ou implicite peuvent être utilisés. Un des plus utilisés est le schéma numérique implicite de Preissmann [CUN 80].

Les modèles numériques ainsi développés peuvent être plus ou moins sophistiqués, et par exemple résoudre les équations linéarisées ou non-linéaires aux ouvrages. Les équations de Saint-Venant peuvent également être résolues avec ou sans prise en compte de leur non-linéarité (itérations à chaque pas de temps de calcul). Certaines conditions d'écoulement peuvent également être prises en compte ou non (écoulements torrentiels, assèchement ou remplissage des biefs, positionnement des ressauts hydrauliques, etc.). A notre connaissance aucun modèle hydraulique ne gère toutes ces options de manière satisfaisante. Des recherches sont donc encore nécessaires dans ce domaine.

1.2. Modèles pour la commande

Les modèles numériques évoqués ci-dessus sont trop complexes pour être utilisés comme tels pour synthétiser un contrôleur automatique. Il est donc nécessaire d'établir des modèles simplifiés, adaptés à la technique de synthèse automatique choisie.

Modèle non-linéaire complet : Pour l'instant, à notre connaissance, aucun contrôleur n'a été synthétisé directement à partir des équations de Saint-Venant complètes non-linéaires de dimension infinie.

Modèle linéaire complet : Une version linéarisée de ces équations peut, par contre, être utilisée [XU 99], [BOU 97], [COR 99], [HAL 01]. Dans ces 2 dernières références [COR 99], [HAL 01] les auteurs conservent l'équation non-linéaire des ouvrages. Ces modèles peuvent donner des informations sur la dynamique des systèmes, mais pour l'instant n'ont été appliqués qu'à des cas très simples, homogènes, uniformes, sans frottements, pour des contrôleurs locaux.

Fonction de transfert linéaire d'ordre infini : Puisque les modèles décrits précédemment ne sont pas très faciles à utiliser pour concevoir un contrôleur, quelques modèles, soit simplifiés, soit mis sous une forme mathématique différente ont été dérivés des précédents. Une linéarisation, une transformation de Laplace et une intégration des équations de Saint-Venant conduisent à un modèle linéaire d'ordre infini [BAU 98a], [BAU 97], de la forme suivante (dans l'espace fréquentiel) :

$$\begin{pmatrix} Q'_x \\ Z'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q'_0 \\ Z'_x \end{pmatrix}$$

où Q'_x est la variation de débit à la distance x , Z'_x est la variation de profondeur d'eau au même emplacement, et Q'_0 et Z'_0 sont ces mêmes valeurs à l'emplacement de référence $x = 0$. Les m_{ij} sont des paramètres obtenus à partir de la géométrie et de l'état hydraulique du système de canal. Ce modèle a l'avantage de conserver les caractéristiques de système à paramètres distribués et donc la dimension infinie de l'état. Si l'on suppose que le système concerné est homogène et aux conditions d'écoulement uniformes alors l'expression des fonctions de transfert m_{ij} est simple. Dans le cas plus général cette modélisation est encore possible, mais les fonctions de transfert m_{ij} doivent être calculées numériquement [LIT 02]. Ces modèles donnent des informations très riches sur la dynamique du système et permettent également de valider d'autres modèles plus simples. On peut, en particulier, valider le modèle non-linéaire d'ordre fini décrit ci-dessous et guider le choix des paramètres de la discrétisation (Δt , Δx , θ) pour garantir une bonne modélisation dans une gamme de fréquences données.

Modèle non-linéaire d'ordre fini : Une version discrétisée des équations de Saint-Venant (dans l'espace, ou le temps et l'espace) peut aussi être utilisée [LIU 94], [PAG 98], [CHE 01]. Une approche numérique est donc utilisée au lieu d'une approche mathématique. L'avantage principal est de simplifier la conception du contrôleur et de permettre cette approche pour presque n'importe quel type de système de canal, tout en conservant le caractère non-linéaire du système. La limitation principale est que ces modèles, basés sur des schémas numériques comme celui de Preissmann ne fonctionnent qu'en écoulement fluvial. La même approche peut, peut-être, être étendue aux écoulements torrentiels, en utilisant d'autres schémas mais cela n'a jamais été fait à notre connaissance. Le schéma numérique introduit un biais dans la modélisation, mais on peut toujours considérer ce type de modèle comme très précis.

Remarque : Sur des systèmes avec des écoulements principalement torrentiels, comme des rivières à pente forte, les équations de Saint-Venant peuvent être simplifiées (en enlevant les termes inertiels). Dans ce cas, le modèle obtenu est un modèle d'onde diffusive non-linéaire. Il peut être résolu numériquement selon le schéma de Cranck-Nicholson. Il peut aussi être à nouveau simplifié en un modèle d'Hayami linéaire.

Modèle linéaire d'ordre fini (modèle dans l'espace d'état) : Le caractère non-linéaire ou de dimension infinie des modèles précédents réduit le champ des méthodologies de synthèse de contrôleurs automatiques qui peuvent être utilisées. Particulièrement, toutes les méthodologies développées dans le domaine des contrôleurs optimaux de type LQR/LQG s'appliquent beaucoup plus facilement et de manière plus opérationnelle sur des modèles plus simples, comme les modèles linéaires dans l'espace d'état, d'ordre fini (modèles dits LTI = Linear Time Invariant) :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_w w(k) \\ z(k) = Cx(k) + Dx(k) \end{cases} \quad (3)$$

Où x est le vecteur d'état, u le vecteur de commande, w le vecteur de perturbation, z le vecteur des variables contrôlées, k l'instant où ces variables sont considérées et A , B , B_w , C et D des matrices de dimensions appropriées.

Un tel modèle peut être obtenu de la linéarisation et discrétisation des équations de Saint-Venant.

En fait, ce modèle est le même que le précédent, sauf que les matrices A , B et B_w sont constantes (elles ne dépendent pas du temps t , ni de l'état x). Un modèle semblable peut aussi être construit de l'agrégation de différentes fonctions de transfert SISO (Single Input, Single Output), entre les différentes variables contrôlées et de contrôle [KOS 94], [LIT 98b]. Nous avons écrit ici le modèle sous sa forme échantillonnée, mais il peut également être écrit sous forme continue en temps.

Modèle linéaire d'ordre fini (fonction de transfert) : L'avantage du modèle précédent est d'être assez simple, de pouvoir être généré à partir de la description géométrique du canal et de tenir compte de l'aspect multivariable du système considéré. Mais, sur de grands systèmes, cela peut être coûteux en terme de données exigées, espace mémoire et temps de calcul. Pour surmonter cette difficulté, des modèles linéaires de fonction de transfert MIMO ou SISO, plus simples, peuvent être utilisés. Ces modèles peuvent être, typiquement, du premier ordre, du deuxième ordre ou du deuxième ordre avec retard, selon la taille du système et des conditions hydrauliques [MAL 94], [SCH 97], [SCH 95], [SAN 97], [WEY 01]. Les paramètres de ces modèles doivent en général être identifiés à partir de mesures ou de données générées par un modèle plus complet.

Modèle de réseau de neurones : Comme dans beaucoup de domaines industriels, des modèles et des contrôleurs à base de réseau neuronal ont été évalués pour des canaux d'irrigation ou des rivières [TOU 95], [TOU 96]. La phase d'identification est coûteuse et difficile. On peut soit développer un modèle neuronal et ensuite essayer de l'inverser pour en faire un contrôleur, soit mettre au point directement un contrôleur neuronal sur le procédé lui-même ou sur une modélisation du procédé. Les deux approches ont été testées. Jusqu'ici, à notre connaissance, ces expériences n'ont pas été couronnées de succès.

Modèle à base de logique floue : Des contrôleurs flous ont été développés et appliqués à des canaux d'irrigation réels (Cf. ci-dessous). Mais, à notre connaissance, des modèles flous n'ont jamais été développés pour les canaux d'irrigation, probablement parce que cela ne présente pas grand intérêt (cela serait intéressant, si comme pour les réseaux de neurones on pouvait ensuite profiter de leur inversion pour en faire un contrôleur avec des propriétés sympathiques).

Modèle de réseau de Petri : La première application de ce type de modèles aux canaux d'irrigation a été présentée récemment [COR 97]. L'avantage de ce type de modèles est de permettre l'utilisation de techniques et outils qui se sont avérés efficaces pour des systèmes ayant une grande ressemblance avec les systèmes de réseau de canaux.

Variables mesurées, contrôlées et de contrôle : Bien que non discuté dans les paragraphes précédents, le choix des variables manipulées par ces modèles est aussi une question importante (des niveaux, des débits, des volumes, des ouvertures de vanne). Les variables mesurées y sont presque toujours des niveaux d'eau à aussi peu

d'emplacements que possible (car faire une mesure coûte cher). D'habitude ces points de mesure sont en amont et en aval des ouvrages de régulation. Si l'ouvrage est dénoyé le niveau en amont peut être suffisant. Souvent ces mesures permettent, à l'aide d'une courbe de tarage calibrée et de l'ouverture de l'ouvrage, de calculer le débit à cet emplacement. Les variables contrôlées z peuvent être des niveaux, des débits, des volumes, à différents emplacements. Ce choix est important d'un point de vue hydraulique [MAL 98b] (Volume de stockage disponible, élévations de berges exigées, etc.). La variable de contrôle U est aussi importante. Quelques personnes utilisent l'ouverture de la vanne, d'autres utilisent le débit à l'ouvrage. Bien que les avantages et les inconvénients des deux approches aient été cités par certains auteurs [MAL 98b], [SCH 97], un consensus clair n'existe pas sur ce point.

2. CONTRÔLEURS

Des méthodologies différentes ont aussi été utilisées pour la conception des contrôleurs. Les plus anciennes et les plus classiques, après quelques méthodes empiriques, sont les contrôleurs PID. Mais en raison du temps de retard inhérent aux systèmes hydrauliques, du comportement non-linéaire et des interactions entre sous-systèmes, les limites des PID sont souvent atteintes, ce qui justifie que beaucoup d'autres méthodes ont été évaluées et sont toujours en phase de développement. Ces méthodes sont listées ci-après, avec les références essentielles. Pour une revue plus complète de la littérature, voir [MAL 97c], [ASC 98].

Méthodes heuristiques monovariabiles : ces méthodes ont été développées basées sur des raisonnements hydrauliques et non pas sur la théorie du contrôle automatique (par exemple : les méthodes Zimbelman ou CARD D décrites dans [ZIM 87]). Bien que citées dans la littérature elles sont à peine opérationnelles et aussi généralement spécifiques au site choisi. LittleMan est une méthode empirique basée sur un contrôleur à trois positions [ROG 95]. Ces méthodes doivent être ajustées sur un modèle de simulation complet ou sur le système réel, puisque leur manque de formalisme rend leur calage et leur validation difficiles. C'est l'inconvénient principal de ces méthodes heuristiques.

PID : La plupart des méthodes de contrôle d'un canal d'irrigation basées sur la théorie du contrôle utilisent le contrôleur linéaire PID monovariabie bien connu. Les exemples de méthodes de type PID sont : P : AMIL, AVIS, AVIO ; PI : ELFLO, BIVAL, Régulation Dynamique, Sogreah ; PID : UMA Ingénierie. Certaines sont ajustées en utilisant un modèle simplifié du processus (Cf. les paragraphes ci-dessus sur les modèles, par exemple par placement de pôles sur une fonction de transfert SISO), certaines sont ajustées directement sur le processus réel ou sur un modèle complet de simulation non-linéaire (par exemple : avec la méthode de Ziegler-Nichols ou des méthodes d'optimisation non-linéaires).

Prédicteur de Smith : Bien que très efficaces dans la plupart des cas, les contrôleurs PID ne tiennent pas explicitement compte des temps de retard caractéristiques des canaux. En 1971, Shand [SHA 71] étudie la possibilité d'utiliser un prédicteur de Smith pour surmonter ce problème, en étudiant l'automatisation du Canal Corning, en Californie, Etats-Unis. Le développement d'un composant analogique de retard présentait, à cette époque, des difficultés technologiques importantes. Donc, quoique moins efficace, la méthode ELFLO avait été finalement choisie. Récemment, la combinaison d'un contrôleur PI avec un prédicteur de Smith a été développée [DEL 92], [SAN 97]. Ce contrôleur est appelé PIR. La technologie digitale moderne et des recherches complémentaires ont résolu les problèmes auxquels Shand s'était heurté.

Placement de pôle : D'autres contrôleurs linéaires ont été utilisés par la CACG [PIQ 84] sur des rivières réalimentées par des barrages, avec des temps de retard importants. Des fonctions de transfert d'ordre élevé sont utilisées et calées avec la technique du placement de pôle. Ces méthodes sont simples et performantes. Le principal défaut de ces réalisations était le manque de robustesse des contrôleurs obtenus. Des travaux complémentaires ont corrigés ces défauts [LIT 98a].

Commande prédictive : La méthode de la commande prédictive, une méthode d'optimisation habituellement monovariabie, a été appliquée aux systèmes de canaux par plusieurs auteurs [SAW 92], [ROD 93], [RUI 98], [PAG 98], [AKO 98]. Elle n'est pas basée sur le comportement désiré en boucle fermée, mais sur la minimisation d'un critère J , pondérant la variable de contrôle et l'erreur entre la variable contrôlée et sa valeur ciblée. La méthode de commande prédictive utilise un modèle sous forme de fonction de transfert ou dans l'espace d'état

[MAL 97d]. Elle peut naturellement incorporer une boucle ouverte et une boucle fermée. Un de ses avantages importants est de pouvoir tenir compte de contraintes temporelles (saturation des actionneurs, changement de modèle, etc). A notre connaissance elle n'a jamais été testée sur un canal réel.

Commande neuronale et commande floue : Des méthodes basées sur les réseaux neuronaux [SCH 93], [TOU 96] et la commande floue [BOU 94], [VOR 97], [STR 97b], [STR 97a] ont été développées. Des algorithmes génétiques ont aussi été évalués sur de tels systèmes. Au moins 3 applications sur le terrain, couronnées de succès, peuvent être annoncées pour la commande floue, sur des systèmes SISO (T2, CPBS au Maroc et les canaux Roosevelt aux USA).

L'avantage principal de la commande floue est de fournir "facilement" un contrôleur non-linéaire du système. Mais sa qualité n'est pas aussi bonne que les précédents. Par ailleurs, pour des systèmes MIMO, cette approche semble difficile. Comme dans le cas des réseaux de neurones on peut soit développer un modèle flou et ensuite essayer de l'inverser pour en faire un contrôleur, soit mettre au point directement un contrôleur flou sur le procédé lui-même ou sur une modélisation du procédé. C'est cette dernière approche qui a été suivie dans les références données ci-dessus.

Inversion de modèle : Différentes méthodes d'inversion de modèles (aussi appelé de calcul inverse) sont décrites dans la littérature, menant généralement à des contrôleurs en boucle ouverte [FAL 87], [O'L 72], [CHE 91], [LIU 92], [BAU 98b] et plus rarement à des contrôleurs en boucle fermée [LIU 94]. Ils sont basés sur un modèle non-linéaire d'ordre fini. L'inversion d'un tel modèle incluant des dynamiques diffusives peut produire un comportement oscillant voir instable. Pour l'empêcher, les coefficients d'amortissement doivent être introduits. Ils doivent être ajustés par une procédure d'essai et d'erreur puisque aucun outil mathématique ne peut le permettre. De tels contrôleurs sont appliqués depuis longtemps sur le terrain, comme la commande "Gate Stroking" [FAL 87]. Les autres travaux ont été testés sur modèle et certains donnent de très bons résultats sur les benchmarks [LIU 98]. On peut cependant leur reprocher leur complexité, le manque apparent de méthodologie de calage et la difficulté de garantir leur robustesse et leur performance.

Méthodes d'optimisation : Ces méthodes sont multivariables, par essence. Différentes méthodes existent : optimisation non-linéaire [TOM 89], [KHA 92], [LIN 92], [CHE 01], [SAN 99], optimisation linéaire [SAB 85], optimisation LQR/LQG [COR 83], [BAL 88], [HUB 87], [GAR 92], [FIL 89], [RED 92], [MAL 94], [MAL 98a]. L'optimisation non-linéaire classique mène seulement à une boucle ouverte, sensible aux erreurs et aux perturbations. Pour présenter une boucle fermée, l'optimisation doit être traitée périodiquement (par exemple à chaque pas de temps). Cela complique la méthode et limite ses applications en raison des contraintes de temps réel. En outre, la détermination de conditions initiales réelles, exigées pour l'optimisation, n'est pas facile. Par contre, les méthodes LQR/LQG, basées sur une représentation dans l'espace d'état peuvent conduire naturellement à une boucle ouverte et une boucle fermée [MAL 98a]. Un contrôleur LQG a été testé récemment sur un canal en Australie. La synthèse de contrôleurs par minimisation de la norme H_2 a été évaluée sur des canaux d'irrigation [SEA 98], [SCH 97]. Cette approche a l'avantage de permettre le choix de la structure du contrôleur multivariable et en particulier de concevoir un contrôleur décentralisé. Quand l'ordre du système est trop grand, ou pour concevoir un contrôleur décentralisé, une approche de décomposition-coordination peut être utilisée [KOS 94], [ELF 98].

Commande robuste : Puisque certaines caractéristiques importantes des systèmes considérés sont les perturbations inconnues fortes et les erreurs de modèle en partie en raison des effets non-linéaires, des approches de contrôle robuste sont intéressantes et ont été évaluées par plusieurs auteurs [SCH 97], [LIT 98a], [LIT 99], [POG 99]. La technique la plus utilisée est la minimisation H_∞ . Elle est très bien adaptée à ce type de problème et de nombreux résultats et outils existent. Des travaux ont également été réalisés à partir de la minimisation de la norme ℓ_1 [MAL 00]. Cette dernière technique présente l'avantage de pouvoir tenir compte de contraintes temporelles, mais conduit à des contrôleurs d'ordre élevé et est encore un peu plus délicate à mettre en oeuvre (bien que des progrès récents aient été faits).

Commande adaptative : Le comportement non-linéaire du modèle peut être pris en compte en utilisant des contrôleurs linéaires adaptatifs [CAR 97] ou en utilisant le séquençement de gain [SAN 97]. De nombreux travaux ont été réalisés mais peu d'applications peuvent être recensées.

Commande non-linéaire : Une approche non-linéaire directe peut aussi être utilisée [COR 99], [HAL 01]. Si les effets non-linéaires sont les difficultés principales de contrôle, cette approche peut être intéressante. Mais c'est un travail qui pour l'instant se limite à des systèmes très simples : bief horizontal, uniforme et sans frottement. Par ailleurs, à notre connaissance, ces méthodes n'ont jamais été testées sur des benchmarks et il est donc difficile de savoir si elles conduisent à des performances qui justifient leur complexité.

3. COMPARAISON

Jusqu'à récemment il était très difficile d'avoir une idée des avantages et des inconvénients des différentes méthodes citées ci-dessus et de leurs performances relatives sur des canaux d'irrigation. C'était en raison du fait que chaque auteur concevait une nouvelle méthode sur un nouveau système de canal, sans comparer sa méthode à d'autres. Quelques travaux de synthèse ont commencé à remplir ce vide [GOU 93], [MAL 95], [ZIM 87]. Un groupe de travail de l'ASCE a proposé de pousser cet effort plus loin et des cas tests ont été définis. Quelques auteurs ont commencé à comparer leurs méthodes sur les cas tests proposés [ASC 98]. Jusqu'ici 3 méthodes ont été évaluées sur ceux-là : CLIS (calcul inverse, [LIU 94]), PILOTE (LQG, [MAL 98a]) et PIR (PI + prédicteur de Smith, [SAN 97]). D'autres méthodes ont été évaluées plus récemment mais sans remplir l'intégralité des conditions des tests, ce qui diminue grandement leur utilité.

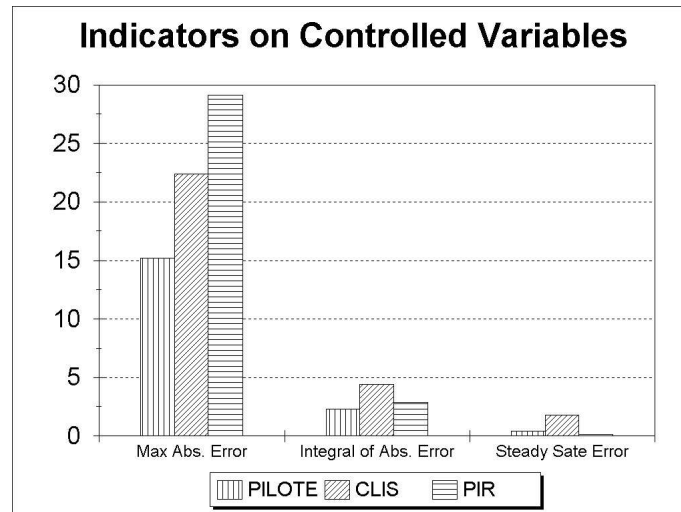


FIG. 2. Indices de performance sur les variables contrôlées

Bien que ces résultats aient été obtenus à partir de simulations sur le même canal et les mêmes scénarios, il est toujours difficile de faire une comparaison définitive. Tout d'abord, chaque auteur a utilisé son propre modèle de simulation, avec quelques différences, puisque les cas tests ont laissé quelques paramètres mineurs non définis (géométrie des vannes par exemple). Ensuite, les objectifs des différents auteurs étaient peut-être différents lors de la conception et du calage du contrôleur. Nous pouvons observer que PILOTE obtient la meilleure performance sur les variables contrôlées (Fig. 2), mais avec une utilisation plus agressive des variables de contrôle (Fig. 3). La capacité d'un contrôleur multivariable de permettre des actions agressives (dans un domaine raisonnable), en restant stable et non-oscillant est une des preuves de sa qualité. Mais peut-être que tous les auteurs n'ont pas essayé d'obtenir ce type de performance. Cela signifie que ces cas tests doivent probablement être améliorés pour fournir une meilleure base pour la comparaison, ce qui semble être un objectif intéressant pour que les différents travaux de recherche accomplis dans ce domaine contribuent à fournir des éléments exploitables par les ingénieurs et gestionnaires.

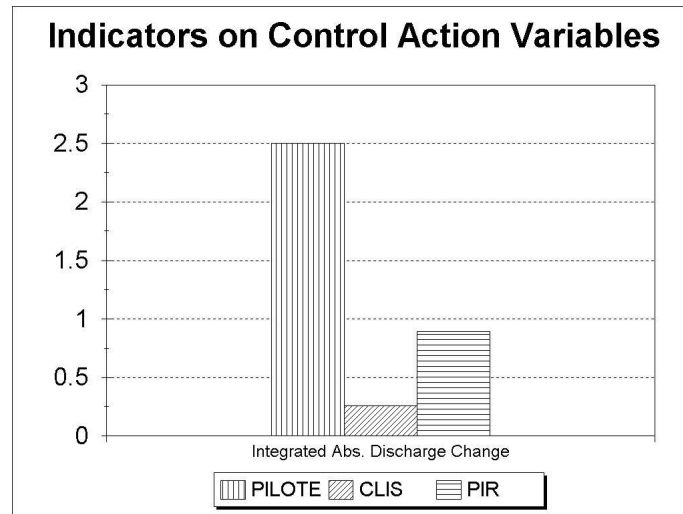


FIG. 3. Indices de performance sur les variables de contrôle

4. CONCLUSION

Des hydrauliciens et des automaticiens ont adapté ou développé de nombreuses méthodes de contrôle monovariables et multivariables pour les systèmes de type canal d'irrigation ou rivière. Toutes ont été développées et évaluées sur des modèles de simulation. Cependant, jusqu'ici, à part de très rares exceptions, seulement des méthodes monovariables en boucle fermée ou des contrôleurs en boucle ouverte ont été appliqués aux systèmes réels. La technique de placement de pôle dans l'espace d'état, les PID multivariables, des contrôleurs de type calcul inverse en boucle fermée, n'ont jamais été appliqués aux canaux d'irrigation réels. Des avancées importantes ont été faites récemment comme cela est montré dans cet article et dans les références citées. Des efforts importants doivent encore être faits pour améliorer la robustesse des algorithmes (le contrôle robuste, le contrôle adaptatif, le contrôle non-linéaire), améliorer la performance des contrôleurs monovariables (découpleur, des contrôleurs prédictifs, des contrôleurs à modèle interne), réduire les efforts informatiques des contrôleurs multivariables (des contrôleurs décentralisés, des réductions de modèles et de contrôleurs) et tenir compte de défauts possibles sur des détecteurs ou des ouvrages (détection de panne, fonctionnement en mode dégradé). Une interaction forte entre les différentes personnes travaillant dans ce domaine, avec des approches différentes et la définition d'une base commune de comparaison des méthodes développées comme les cas tests cités ci-dessus faciliteraient ce travail. Des canaux réduits (à l'ENSAM à Montpellier, au Laboratoire d'Automatique de Grenoble, à l'ENSEEITH à Toulouse) et des sites expérimentaux (le canal de Gignac) sont également disponibles depuis peu pour valider les algorithmes développés dans des conditions réalistes ou réelles.

5. REFERENCES

6. Bibliographie

- [AKO 98] AKOUZ K., BENHAMMOU A., MALATERRE P.-O., DAHHOU B., ROUX G., Predictive Control Applied to ASCE Canal 2, *IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98)*, San Diego, California, vol. October 11-14, 1998, p. 3920-3924.
- [ASC 98] ASCE, Special issue on canal automation, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, n° 1, 1998.
- [BAL 88] BALOGUN O., HUBBARD M., DEVRIES J., Automatic control of canal flow using linear quadratic regulator theory, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 114, n° 1, 1988, p. 75-102.

-
- [BAU 97] BAUME J.-P., SAU J., Study of irrigation canal dynamics for control purpose, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, vol. April 22-24, 1997, p. 3-12.
- [BAU 98a] BAUME J.-P., SAU J., MALATERRE P.-O., Modeling of Irrigation Channel Dynamics for Controller Design, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98), San Diego, California*, vol. October 11-14, 1998, p. 3856-3861.
- [BAU 98b] BAUTISTA E., CLEMMENS A., An open-loop control system for open-channel flows, *ASCE Int. Water Resources Engineering Conference, Memphis*, vol. August 3-7, 1998.
- [BOU 94] BOUILLOT A.-P., Application of the fuzzy set theory to the control of a large canal, *ASCE - AFEID Meeting, Aix-en-Provence, France*, vol. October, 1994, 25 p.
- [BOU 97] BOUNIT H., HAMMOURI H., SAU J., Regulation of an irrigation canal through the semigroup approach, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, vol. April 22-24, 1997, p. 261-267.
- [CAR 97] CARDONA J., GOMEZ M., RODELLAR J., A decentralized adaptive predictive controller for irrigation canals, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, vol. April 22-24, 1997, p. 215-219.
- [CHE 91] CHEVEREAU G., Contribution à l'étude de la régulation dans les systèmes hydrauliques à surface libre, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1991, 122 p.
- [CHE 01] CHEN M.-L., Commandes optimale et robuste des équations aux dérivées partielles régissant le comportement des systèmes hydrauliques à surface libre, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juillet 2001, in French.
- [COR 83] CORRIGA G., SANNA S., USAI G., Sub-optimal constant-volume control for open channel networks, *Appl. Math. Modelling*, vol. 7, 1983, p. 262-267.
- [COR 97] CORRIGA G., GIUA A., USAI G., Petri Net modeling of irrigation canal networks, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97*, vol. April 22-24, 1997, p. 39-48.
- [COR 99] CORON J., D'ANDREA NOVEL B., BASTIN G., A Lyapunov approach to control irrigation canals modeled by Saint-Venant's equations, *International European Control Conference ECC'99, Karlsruhe, Germany*, 1999.
- [CUN 80] CUNGE J., HOLLY F., VERWEY A., *Practical aspects of computational river hydraulics*, Pitman Advanced Publishing Program, 1980, 420 p.
- [DEL 92] DELTOUR J.-L., Application de l'automatique numérique à la régulation des canaux; Proposition d'une méthodologie d'étude, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [ELF 98] EL FAWAL H., GEORGES D., BORNARD G., Optimal control of complex irrigation systems via decomposition-coordination and the use of augmented Lagrangian, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98), San Diego, California*, vol. October 11-14, 1998, p. 3874-3879.
- [FAL 87] FALVEY H., *Philosophy and implementation of Gate Stroking*, Proceedings ASCE Portland, Zimbelman D.D. (ed.), 1987.
- [FIL 89] FILIPOVIC V., MILOSEVIC Z., Dyn² method for optimal control of water flow in open channels, *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 115, n° 6, 1989, p. 973-981.
- [GAR 92] GARCIA A., HUBBARD M., DEVRIES J., Open channel transient flow control by discrete time LQR methods, *Automatica*, vol. 28, n° 2, 1992, p. 255-264.
- [GOU 93] GOUSSARD J., *L'automatisation des réseaux d'irrigation en canaux*, Commission Internationale des Irrigations et du Drainage, Groupe de travail sur la Construction, la Réhabilitation et la Modernisation des Projets d'Irrigation, ICID, 1993, 103 p.
- [HAL 01] DE HALLEUX J., BASTIN G., D'ANDREA-NOVEL B., CORON J.-M., A Lyapunov approach for the control of multi-reach channels modelled by Saint Venant equations, *CD-Rom IFAC NOLCOS 01 Conference, St Petersburg*, vol. July, 2001, p. 1515-1520.
- [HUB 87] HUBBARD M., DEVRIES J., BALOGUN O., Feedback control of open channel flow with guaranteed stability, *AIRH Congress*, vol. Lausanne, 1987, p. 408-413.
- [KHA 92] KHALADI A., Gestion automatique des transferts d'eau en réseaux hydrauliques maillés à surface libre ; Application au réseau des Wateringues, PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon, CEMAGREF, 1992, 237 p.
- [KOS 94] KOSUTH P., Techniques de régulation automatique des systèmes complexes : application aux systèmes hydrauliques à surface libre, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - CEMAGREF - LAAS CNRS, 1994, 334 p.

- [LIN 92] LIN Z., MANZ D., Optimal operation of irrigation canal systems using nonlinear programming - dynamic simulation model, *CEMAGREF-IIMI International Workshop, Montpellier*, vol. October, 1992, p. 297-306.
- [LIT 98a] LITRICO X., GEORGES D., TROUVAT J.-L., Modelling and robust control of a dam-river system, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98), San Diego, California*, vol. 4, 1998, p. 3862-3867, ISBN : 0-7803-4778-1.
- [LIT 98b] LITRICO X., MALATERRE P.-O., GEORGES D., TROUVAT J.-L., Commande Optimale d'un Système Barrage-Rivière avec Points de Mesure Intermédiaires, *Colloque SHF, 25èmes Journées de l'Hydraulique, 15 au 17 Septembre 1998 à Chambéry*, vol. Septembre, 1998.
- [LIT 99] LITRICO X., Modélisation, identification et commande robuste de systèmes hydrauliques à surface libre, Ph.D. thesis, ENGREF - Cemagref, 1999, in French.
- [LIT 02] LITRICO X., FROMION V., Infinite dimensional modeling of open-channel hydraulic systems for control purposes, *41th IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, Nevada*, vol. December, 2002.
- [LIU 92] LIU F., FEYEN J., BERLAMONT J., Computation method for regulating unsteady flow in open channels, *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 118, n° 10, 1992, p. 674-689.
- [LIU 94] LIU F., FEYEN J., BERLAMONT J., Downstream control algorithm for irrigation canals, *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 120, n° 3, 1994, p. 468-483.
- [LIU 98] LIU F., FEYEN J., MALATERRE P.-O., BAUME J.-P., KOSUTH P., Development and Evaluation of Canal Automation Algorithm CLIS, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, n° 1, 1998, p. 40-46, ISSN 0733-9437.
- [MAL 94] MALATERRE P.-O., *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation*, PhD Thesis LAAS-CNRS-ENGREF-Cemagref, Etude EEE n° 14, 1994, in French.
- [MAL 95] MALATERRE P.-O., Regulation of irrigation canals : characterisation and classification, *International Journal of Irrigation and Drainage Systems*, vol. 9, n° 4, 1995, p. 297-327.
- [MAL 97a] MALATERRE P.-O., BAUME J.-P., SIC : theoretical concepts, rapport, 1997, Cemagref, 70 p.
- [MAL 97b] MALATERRE P.-O., BAUME J.-P., SIC : user's guide, rapport, 1997, Cemagref, 121 p.
- [MAL 97c] MALATERRE P.-O., BAUME J.-P., POURCIEL J.-B., DAHOU B., AGUILAR J., A. B., *Proceedings of the International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, Cemagref, Laas, University of Marrakech, April 22-24 1997.
- [MAL 97d] MALATERRE P.-O., RODELLAR J., Multivariable predictive control of irrigation canals. Design and evaluation on a 2-pool model, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, vol. April 22-24, 1997, p. 230-238.
- [MAL 98a] MALATERRE P.-O., PILOTE : linear quadratic optimal controller for irrigation canals, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, n° 4, 1998, p. 187-194, ISSN 0733-9437.
- [MAL 98b] MALATERRE P.-O., ROGERS D. C., SCHUURMANS J., Classification of Canal Control Algorithms, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 124, n° 1, 1998, p. 3-10, ISSN 0733-9437.
- [MAL 00] MALATERRE P.-O., KHAMMASH M., ℓ_1 controller design for a high-order 5-pool irrigation canal system, *IEEE-CDC conference, in Sydney, Australia*, vol. December, 2000.
- [O'L 72] O'LOUGHLIN E., Application of unsteady flow analysis to operation decisions in long aqueducts, *VIIIth ICID Congress, Bulgaria*, vol. R. 16, Q. 28-2, 1972.
- [PAG 98] PAGÈS J., COMPAS J., SAU J., MIMO Predictive Control with Constraints by Using an Embedded Knowledge Based Model, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98), San Diego, California*, vol. October 11-14, 1998, p. 3902-3907.
- [PIQ 84] PIQUEREAU A., TARDIEU H., VERDIER J., VILLOCEL A., Réduction des pertes en eau par l'automatisation de la gestion d'un barrage réalimentant une rivière en vue de l'irrigation, *Communication au XIIème congrès de la CIID*, vol. Question 38, Chap 1, Paragraphe 5, 1984, page 16 p.
- [POG 99] POGNANT-GROS P., Modélisation et commande H_∞ d'un canal d'irrigation, M. Sc. thesis, Université de Caen, Laboratoire d'Automatique et de Commande des Processus de l'ISMRA, INRA Biométrie, Cemagref, 1999.
- [RED 92] REDDY J., DIA A., OUSSOU A., Design of control algorithm for operation of irrigation canals, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 118, n° 6, 1992, p. 852-867.
- [ROD 93] RODELLAR J., GOMEZ M., BONET L., Control method for on-demand operation of open-channel flow, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119, n° 2, 1993, p. 225-241.

- [ROG 95] ROGERS D., EHLEH D., FALVEY H., SERFOZO E., VOORHEIS P., JOHANSEN R., ARRINGTON R., ROSSI L., Canal systems automation manual, Volume 2, rapport, 1995, A Water Resources Technical Publication, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation.
- [RUI 98] RUIZ CARMONA V., RAMIREZ LUNA J., Predictive Control in Irrigation Canal Operation, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98), San Diego, California*, vol. October 11-14, 1998, p. 3897-3901.
- [SAB 85] SABET M., COE J., RAMIREZ H., FORD D., Optimal operation of California Aqueduct, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 111, n° 2, 1985, p. 222-237.
- [SAI 71] BARRÉ DE SAINT-VENANT A. J. C., Théorie du mouvement non-permanent des eaux avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 73, 1871, p. 148-154, 237-240.
- [SAN 97] SANFILIPPO F., Application de l'automatique multivariable à la régulation des canaux. Comparaison avec une approche monovariable, PhD thesis, Université Claude Bernard-Lyon 1, Octobre 1997, 197 p.
- [SAN 99] SANDERS B. F., KATOPODES N. D., Control of Canal Flow by Adjoint Sensitivity Method, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 125, n° 5, 1999, p. 287-297.
- [SAW 92] SAWADOGO S., Modélisation, commande prédictive et supervision d'un système d'irrigation, PhD thesis, LAAS-CNRS Toulouse, 1992, 152 p.
- [SCH 93] SCHAALJE M., MANZ D., ANN controller, Personal communication, 1993.
- [SCH 95] SCHUURMANS J., BOSGRA O., BROUWER R., Open-channel flow model approximation for controller design, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 19, 1995, p. 525-530.
- [SCH 97] SCHUURMANS J., Control of water levels in open-channels, Ph. D thesis, ISBN 90-9010995-1, Delft University of Technology, 1997.
- [SEA 98] SEATZU C., GIUA A., USAI G., Decentralized volume control of open-channels using H_2 norm minimization, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'98), San Diego, California*, vol. October 11-14, 1998, p. 3891-3896.
- [SHA 71] SHAND M., Automatic downstream control systems for irrigation canals, PhD thesis, University of California, Berkeley, 1971, 159 p.
- [STR 97a] STRINGAM B., MERKLEY G., Field Application of a fuzzy controller for an irrigation canal in Roosevelt Utah, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, vol. April 22-24, 1997, p. 349-354.
- [STR 97b] STRINGAM B., MERKLEY G., Fuzzy controller simulation for local downstream water level control in canals, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97, Marrakech (Morocco)*, vol. April 22-24, 1997, p. 342-348.
- [TOM 89] TOMICIC B., A general optimization module for real-time control of surface water resources, Master's thesis, The International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft University, 1989, 174 p.
- [TOU 95] TOUDEFT A., Neural control of nonlinear non-minimum phase dynamical systems, in the *Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, Alès, France*, vol. May 18-21, 1995.
- [TOU 96] TOUDEFT A., Combining neural and adaptive controllers for a non-minimum phase varying time delay system, *Journées Hispano-Françaises : Systèmes intelligents et contrôle avancé, Barcelona (Spain), Université Polytechnique de Catalogne*, vol. November 12-13, 1996.
- [VOR 97] VORON B., BOUILLOT A., Application of the fuzzy set theory to the control of a large canal, *International Workshop on the Regulation of Irrigation Canals : State of the Art of Research and Applications, RIC97*, vol. April 22-24, 1997, p. 317-331.
- [WEY 01] WEYER E., System identification of an open water channel, *Control engineering practice*, vol. 9, 2001, p. 1289-1299.
- [XU 99] XU C., SALLET G., Proportional and integral regulation of irrigation canal systems governed by the St Venant equation, *14th Triennial World Congress, IFAC 99*, vol. E-2c-10-2, Beijing, China, 1999, p. 147-152.
- [ZIM 87] ZIMBELMAN D. D. E., *Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems*, Proceedings of a symposium ASCE, Portland, Oregon, USA, ASCE, New York, 28-30 Juillet 1987, 391 pp.