



UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1
43, bd du 11 Novembre 1918
69622 VILLEURBANNE



DEA Ingénierie des Systèmes Automatisés
(ISA)

Thème

**COMMANDE PRÉDICTIVE D'UN
CANAL D'IRRIGATION**

Présenté par : Errouissi RACHID
Encadré par : Pascal Dufour
Laurent Lefevre

08/07/2004

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1
43, bd du 11 Novembre 1918
69622 VILLEURBANNE



Lieu de stage : LAGEP

DEA Ingénierie des Systèmes Automatisés (ISA)
2003-2004

Sujet : Commande prédictive d'un canal d'irrigation

Date : 08/07/2004

Présenté par : Errouissi RACHID
Encadré par : Pascal Dufour
Laurent Lefevre

Introduction

Le laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes de Valence met à la disposition de chercheurs appartenant à une action spécifique (AS) du CNRS « Automatisation et mise en œuvre des canaux d'irrigation » une maquette de canal sur laquelle ils peuvent tester leurs lois de commande avant de les appliquer sur des canaux réels. Dans ce contexte, de nombreuses stratégies de commande ont été étudiées et testées.

Notre travail, qui s'inscrit dans le cadre de cette action spécifique du CNRS, consiste à l'évaluation d'une nouvelle approche de contrôle prédictif sur ce canal pilote.

Plan

- # Présentation du micro-canal de Valence
- # Cahier de charges
- # Modélisation du comportement d'eau dans le canal
- # Discrétisation et Simulation du modèle d'un bief en boucle ouverte
- # la commande prédictive pour le micro-canal de Valence
- # Réalisation de l'approche prédictive, en simulation
- # Conclusion & Perspectives
- # Bibliographie

Présentation du micro-canal de Valence

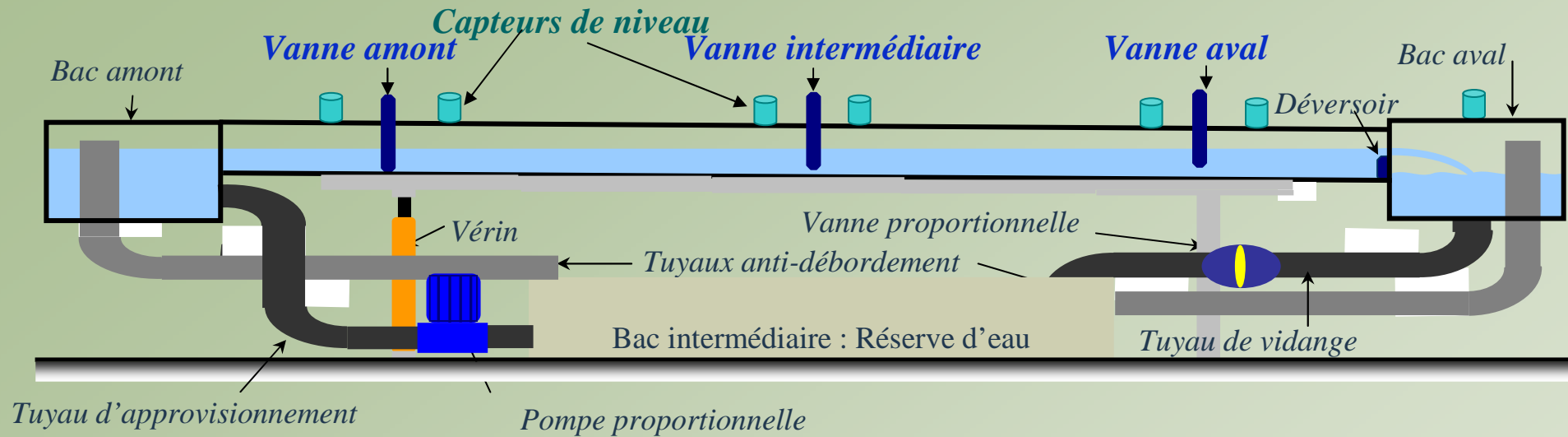


Figure1. Schéma complet du canal d'irrigation constitué de deux biefs.

Bief : une portion du canal, située entre 2 vannes

Les variables de commandes : les ouvertures des vannes à l'amont et à l'aval

Les variables à contrôler : le débit et le niveau d'eau à l'amont et à l'aval

Cahier de charges

- La régulation du débit et du niveau d'eau à l'aval

$$Q(L^+,t) \Rightarrow Q_{\text{ref}} \quad ; \quad h(L^-,t) \Rightarrow h_{\text{ref}}$$

- Les contraintes sur la commande :

$$\theta_{\text{min}} \leq \theta(t) \leq \theta_{\text{max}} \quad ; \quad \Delta\theta_{\text{min}} \leq \theta(t) - \theta(t-1) \leq \Delta\theta_{\text{max}}$$

- Les contraintes sur l'état :

$$h_{\text{min}} \leq h(x_i,t) \leq h_{\text{max}} \quad (x_i=L/2) : \text{position intermédiaire}$$

- Les contraintes sur la sortie :

$$Q_{\text{min}} \leq Q(L^+,t) \leq Q_{\text{max}}$$

- Les contraintes sur le temps de calcul

$$\text{Période d'échantillonnage} : T_e \leq 0.1\text{s}$$

Modélisation du comportement d'eau dans le canal : Modèle de Saint-Venant

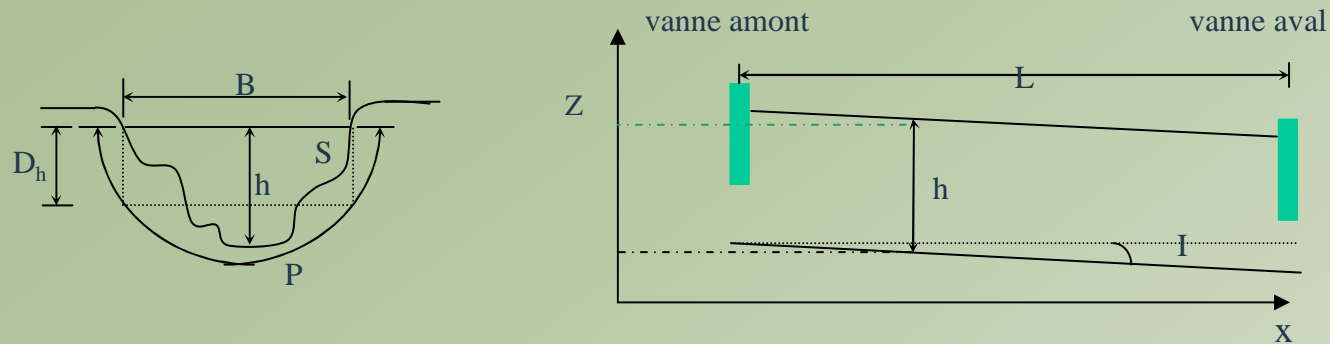


Figure2. Coupe longitudinale et transversale d'une section de canal

- La conservation de la masse : équation de continuité

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{1}{B} \frac{dQ}{dx}$$

- La conservation de la quantité de mouvement : équation dynamique

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{1}{B} \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{h} \right) - gBh \left(\frac{dh}{dx} + J(Q,h) - I \right)$$

Ces équations sont appelées équations de Barré Saint-Venant

- Les conditions aux limites et les conditions initiales :

C.L: $Q(0,t)=Q(t)$ & $h(L,t)=h(t)$; **C.I:** $h(x,0)=h(x)$ & $Q(x,0)=Q(x)$ pour $x \in [0,L]$

Modélisation du comportement d'eau dans le canal : Régime d'équilibre

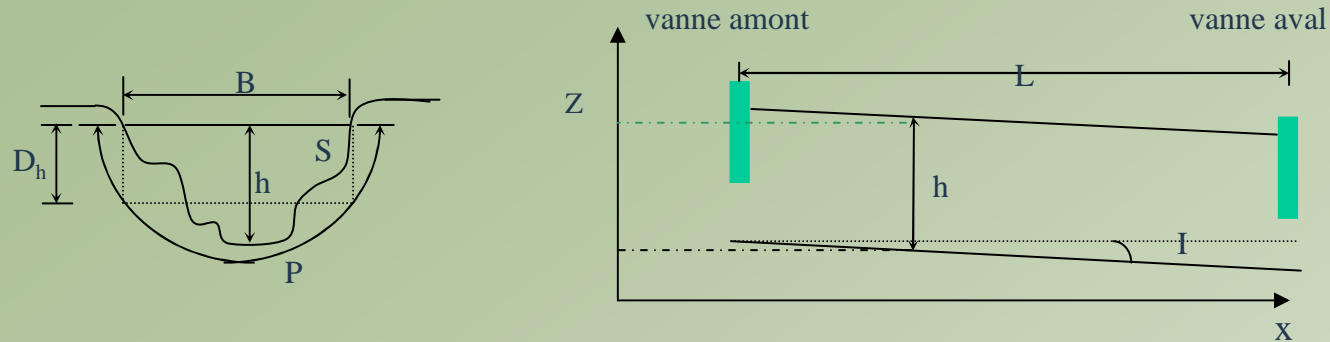


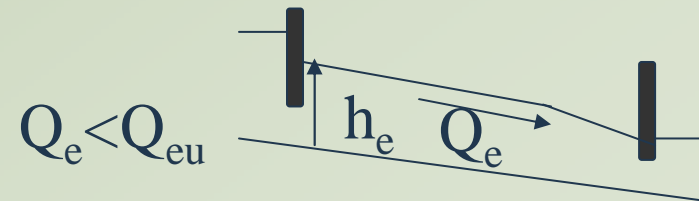
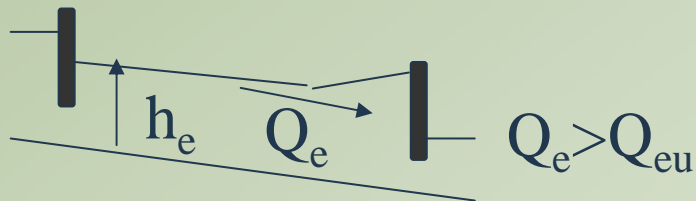
Figure 2. Coupe longitudinale et transversale d'une section de canal

➤ Régime d'équilibre : $Q_e(x) = Q_{eu} = cte$

- Profil uniforme : $J_e(Q_e, h_e) = I$



- Profil non-uniforme :



Modélisation du comportement d'eau dans le canal : Linéarisé tangent

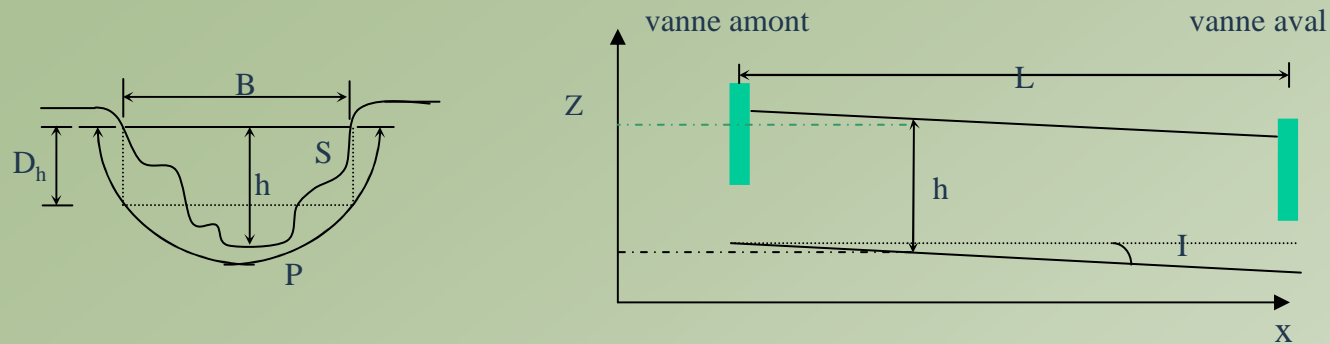


Figure 2. Coupe longitudinale et transversale d'une section de canal

➤ Linéarisé tangent autour d'un point d'équilibre (h_e, Q_e)

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta h}{\partial t} = -\frac{1}{B} \frac{\partial \delta Q}{\partial x} \\ \frac{\partial \delta Q}{\partial t} = a_1 \frac{\partial \delta h}{\partial x} - a_2 \frac{\partial \delta Q}{\partial x} + a_3 \delta h - a_4 \delta Q \end{cases}$$

Avec : $a_i = f(h_e, Q_e)$ et $\left(\frac{a_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{B}\right) > 0$

Le système obtenu est à paramètres répartis, linéaire et hyperbolique

Modélisation du comportement d'eau dans le canal : Loi d'ouvrage

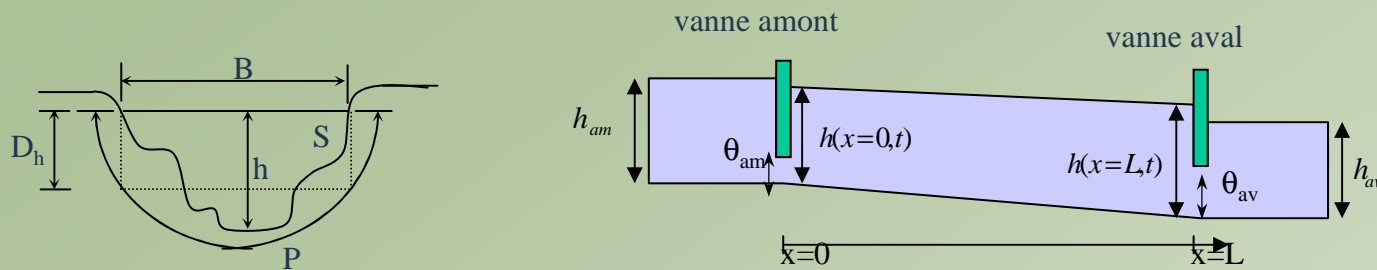
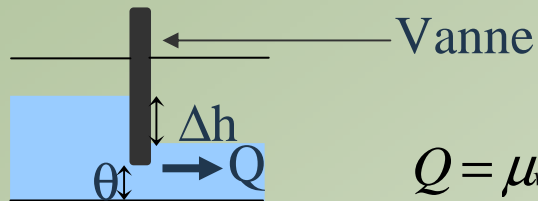


Figure 3. Coupe longitudinale et transversale d'une section de canal

➤ Équation d'une vanne



$$Q = \mu_{vanne} \theta B \sqrt{2g(\Delta h)}$$

➤ Équation de la vanne située à l'amont

$$Q(0, t) = \mu_{vanne_amont} \theta_{am} B \sqrt{2g(h_{am} - h(0, t))} \longrightarrow \text{C.L à l'amont : } Q(x=0, t)$$

➤ Équation de la vanne située à l'aval

$$Q(L, t) = \mu_{vanne_aval} \theta_{av} B \sqrt{2g(h(L, t) - h_{av})} \longrightarrow \text{C.L à l'aval : } h(x=L, t)$$

Discretisation et Simulation : Discretisation

➤ Méthode de Preissman : discretisation du temps et de l'espace

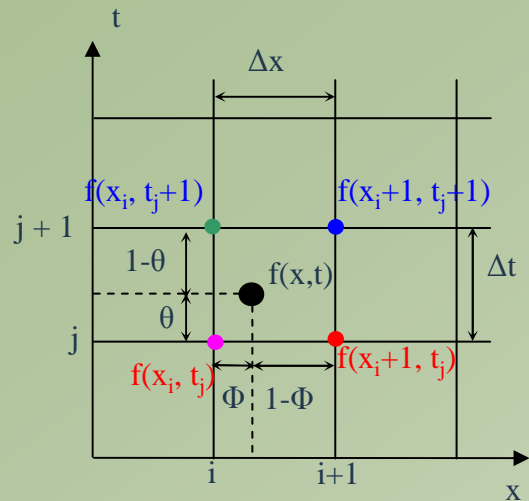


Figure 4- Schéma de Preissman.

$$\begin{cases} f(x,t) = \theta (\Phi f_{i+1}^{j+1} + (1-\Phi) f_i^{j+1}) + (1-\theta) (\Phi f_{i+1}^j + (1-\Phi) f_i^j) \\ \frac{\partial f}{\partial x}(x,t) = \frac{1}{\Delta x} [\theta (f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}) + (1-\theta) (f_{i+1}^j - f_i^j)] \\ \frac{\partial f}{\partial t}(x,t) = \frac{1}{\Delta t} [\Phi (f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j) + (1-\Phi) (f_i^{j+1} - f_i^j)] \end{cases}$$

Principe de discretisation selon le schéma de preissman

➤ Condition de stabilité

- concernant θ : il suffit de prendre $0.5 \leq \theta \leq 1$
- concernant Φ : on la prend égale à 0.5.

➤ Le modèle discret : Le modèle discret obtenu, selon le schéma de preissman, s'écrit sous la forme d'un système d'équations discrètes **implicites** non linéaires.

Discrétisation et Simulation : Simulation à partir du EDP non linéaires

➤ Résolution du système d'équations non linéaires :

- Méthodes itératives de MATLAB (fsolve) : moins précis en régime permanent, moins rapide
- Méthode de Newton-Raphson : plus rapide et plus précis

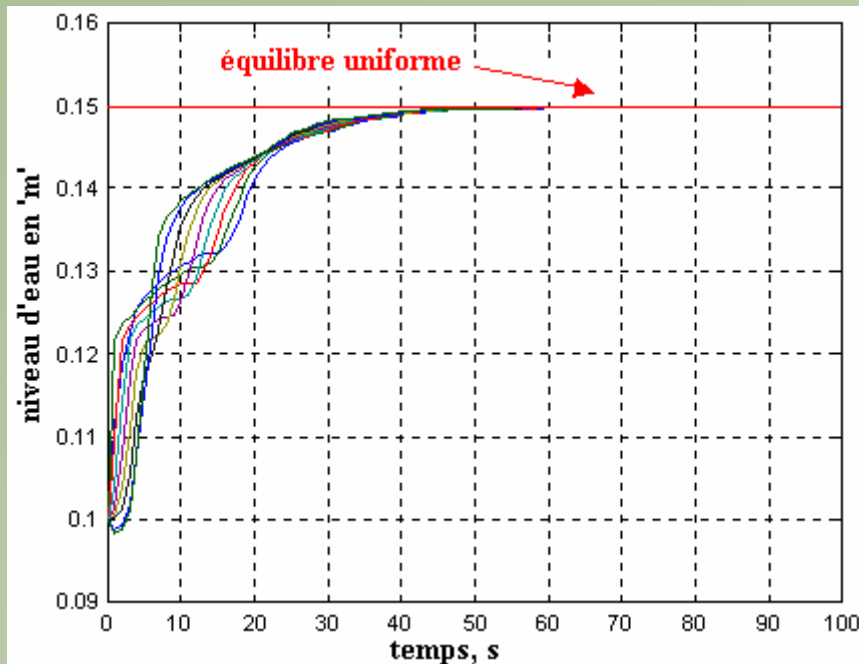


Figure5. Le niveau d'eau dans différents points du canal

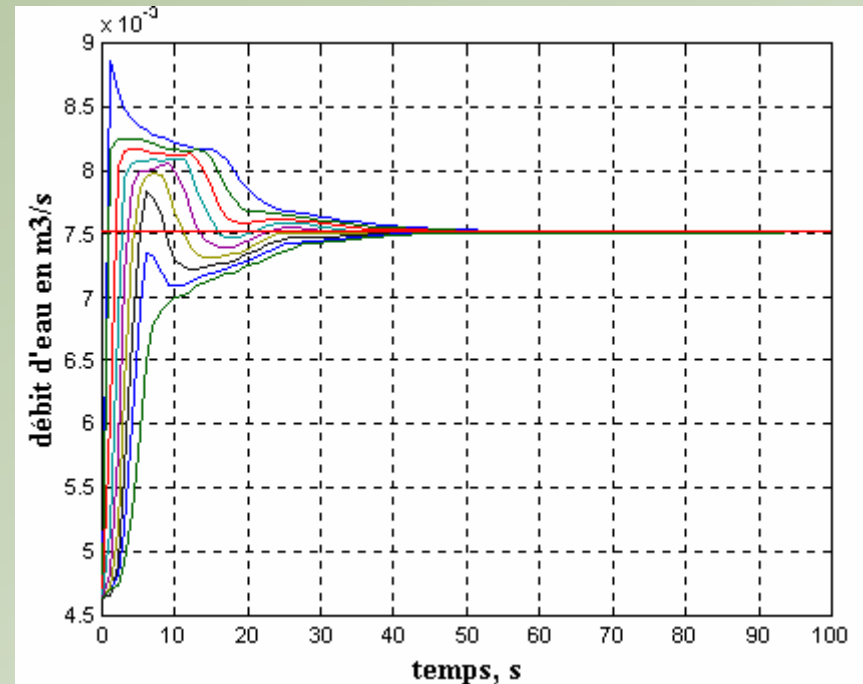


Figure6. Le débit d'eau dans différents points du canal

Interprétation : Système à non minimum de phase

Inconvénient pour la commande : Nécessite un temps de calcul énorme

Remède : Utilisation du linéarisé pour élaborer la loi de commande

Discrétisation et Simulation : Simulation à partir du EDP linéaires

- **Discrétisation du linéarisé tangent autour d'un point d'équilibre uniforme** : utilisation du schéma de preissman

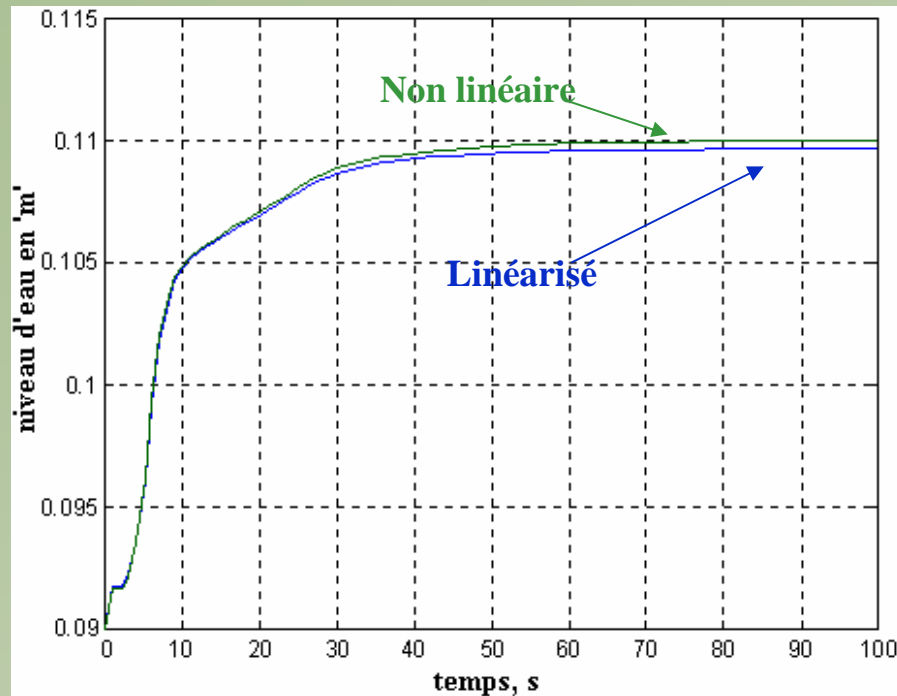


Figure7. Le niveau d'eau à l'aval (sortie à réguler)

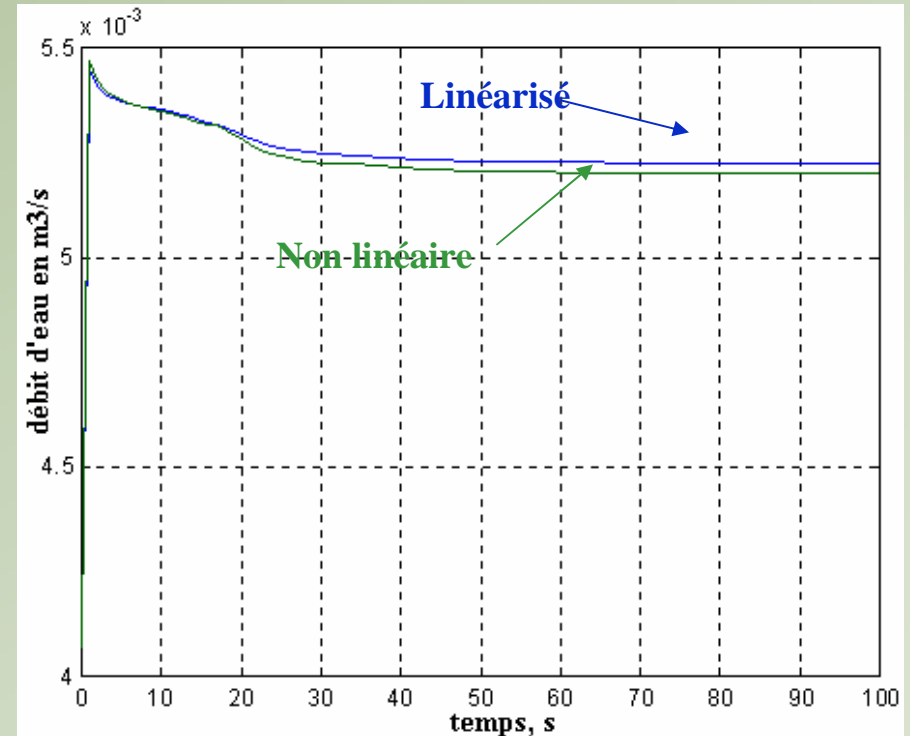


Figure8. Le débit d'eau à l'aval (sortie à réguler)

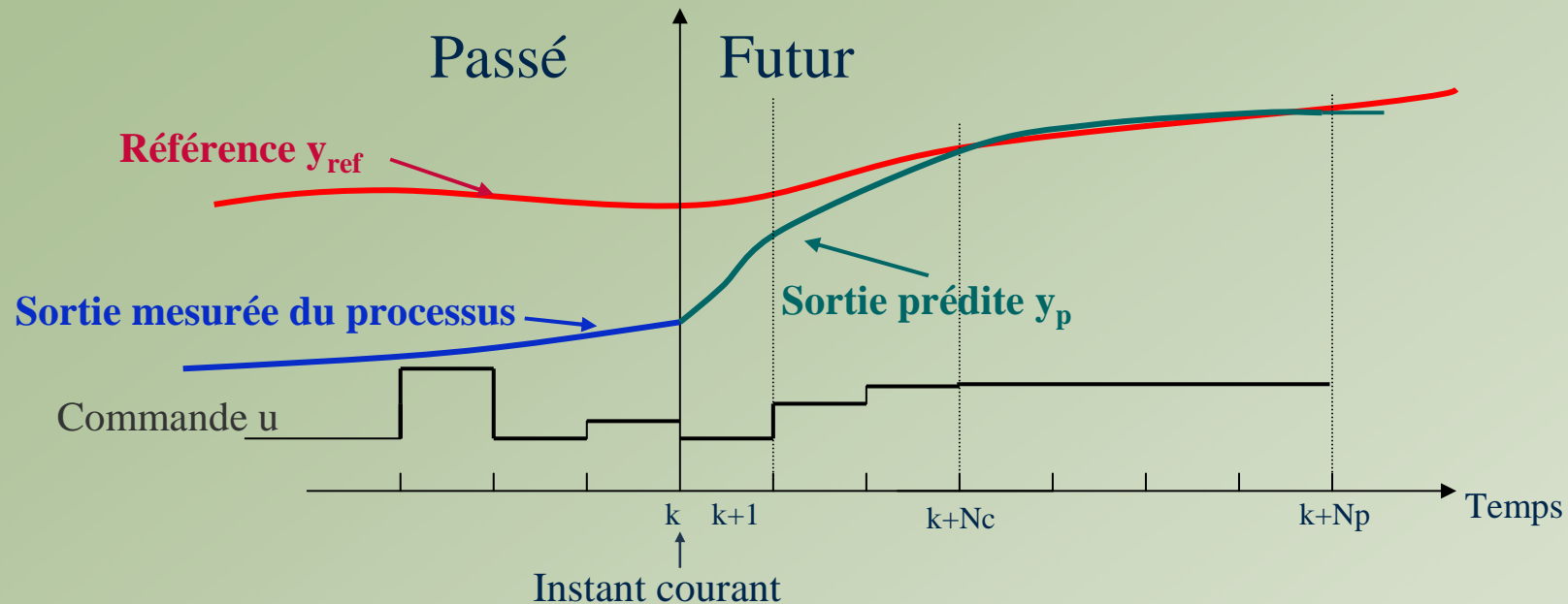
- **Interprétation** : En régime dynamique le linéarisé fournit une bonne approximation de la solution des équations de Saint-Venant non linéaires

Récapitulatif

- **Du côté du modèle** : les équations de Saint-Venant non linéaires seront prises comme une référence numérique pour tester la loi de commande
- **Du côté de la méthode de discrétisation** : le schéma de Preissman est un schéma numérique de référence.
- **Résolution du modèle discret non linéaire** : Pour notre problème, l'algorithme de Newton-Raphson offre plus rapidité et plus précision
- **Modèle pour la commande** : A fortiori, le linéarisé autour d'un point d'équilibre uniforme est suffisant, pour développer notre loi de commande

la commande prédictive pour le micro-canal de Valence : Principe de base

- Principe de la commande prédictive : *Moving Horizon Control, Receding Horizon control*



N_c : appelé horizon de commande ; N_p : appelé horizon de prédiction

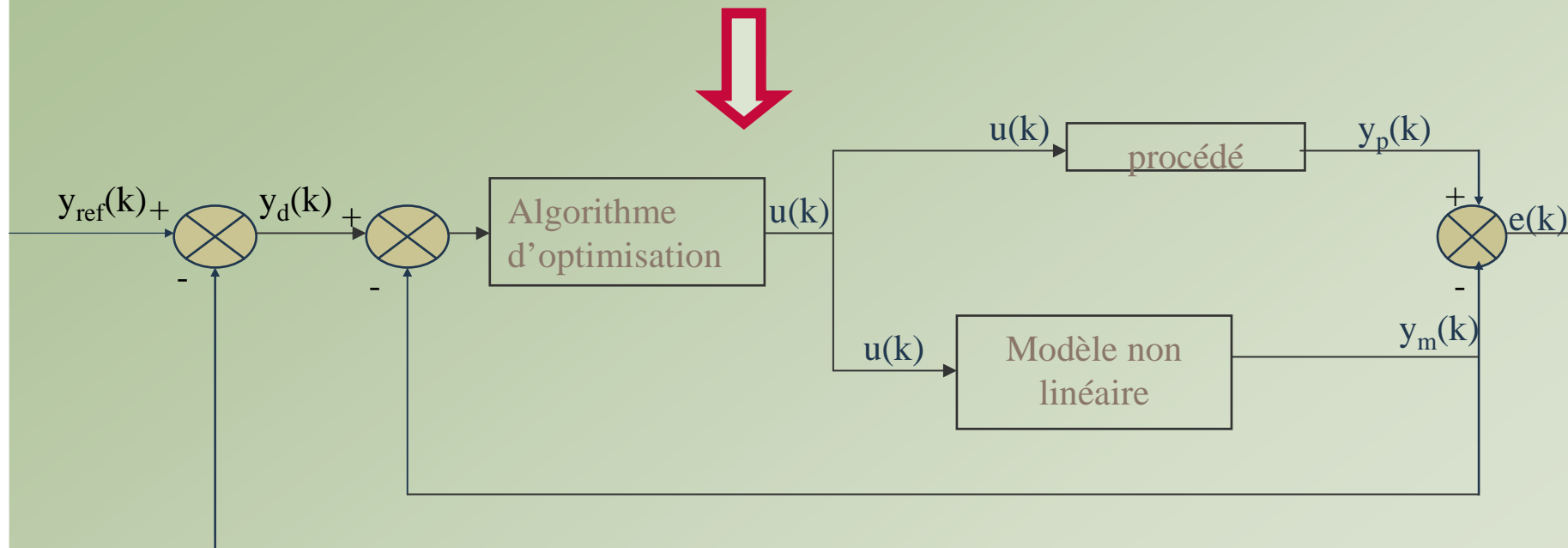
- Modèle de procédé à commander
- Une trajectoire de référence, dans le futur
- Un critère d'optimisation, dans le futur :
- Une méthode de résolution du critère

$$\min_{u(k) \dots u(k+N_c-1)} J = \sum_{j=k+1}^{j=k+N_p} (y_{ref}(j) - y_p(j))^T Q (y_{ref}(j) - y_p(j))$$

la commande prédictive pour le micro-canal de Valence : Structure de commande

- **Position du problème :** Comment peut-on évaluer les sorties futures (y_p) sur l'horizon de prédiction N_p ?

Solution (structure de commande par modèle interne)



- **Inconvénient :** Modèle non linéaire nécessite un temps de calcul énorme
- **Solution :** Avoir recours au linéarisé tangent autour d'un point d'équilibre uniforme

la commande prédictive pour le micro-canal de Valence : Structure de commande

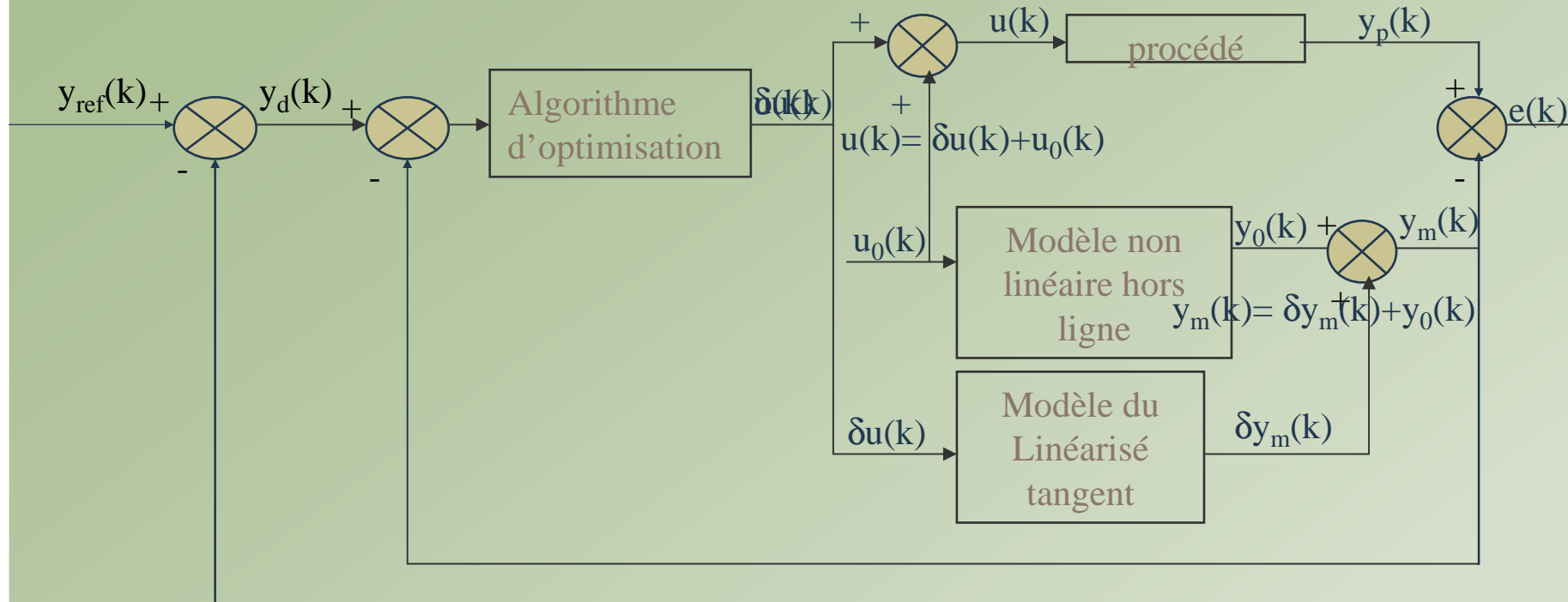


Figure 9. Structure de commande par modèle interne, basée sur le linéarisé tangent

➤ Problème d'optimisation résultant :

$$\min_{\delta u(k), \dots, \delta u(k+N_c-1)} J = \sum_{j=k+1}^{j=k+N_p} (y_{ref}(j) - y_0(j) - e(j) - \delta y_m(j))^T Q (y_{ref}(j) - y_0(j) - e(j) - \delta y_m(j))$$

Hypothèse : [13] $\longrightarrow e(j) = e(k) \quad \forall j \in [k+1, k+N_p]$

la commande prédictive pour le micro-canal de Valence : Les contraintes

➤ Prise en compte des contraintes sur la commande

❖ Méthode de transformation de variables

$$\delta u_{\min} \leq \delta u \leq \delta u_{\max} \xrightarrow{\text{Transformé en}} \delta u = f(p) = \frac{1}{2}(\delta u_{\max} + \delta u_{\min}) + \frac{1}{2}(\delta u_{\max} - \delta u_{\min}) \tanh(p)$$

δu : le vecteur de commande, contraint, recherché

p : nouveau paramètre, non contraint, à rechercher (argument)

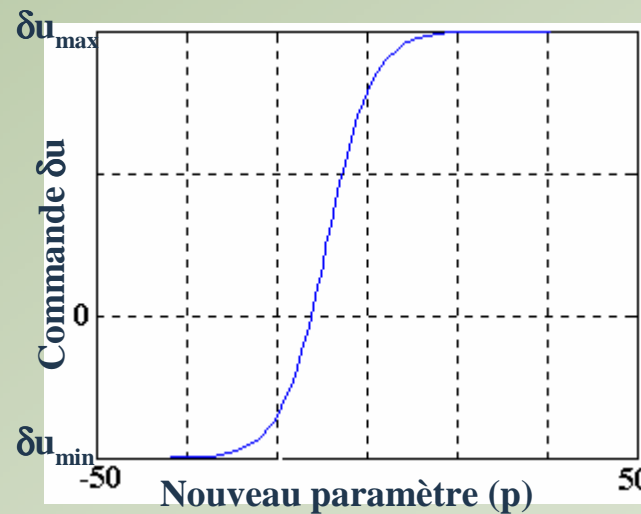


Figure10. Illustration de la méthode de transformation

la commande prédictive pour le micro-canal de Valence : Les contraintes

➤ Prise en compte des contraintes sur la sortie et sur l'état

❖ Méthode de pénalité externe

Le critère de performance J est pénalisé par une fonction $H(c_i(\delta u, \delta x, \delta y))$ lorsque les contraintes ne sont plus respectées, càd $(c_i(\delta u, \delta x, \delta y) > 0)$.

$$H(c_i(\delta u, \delta y)) = \sum_{i=1}^{i=nc} \max^2(0, c_i(\delta u, \delta y)) \quad \longrightarrow \quad J_{tot} = J + \omega_i \sum_{j=k+1}^{j=k+Np} H(c_i(\delta u(j-1), \delta y(j)))$$

➤ Problème d'optimisation final

$$\min_p J_{tot} = \left[\sum_{j=k+1}^{j=k+Np} (y_d(j) - \delta y_m(j))^T Q (y_d(j) - \delta y_m(j)) \right] + \left[\omega_i \sum_{j=k+1}^{j=k+Np} \sum_{i=1}^{i=nc, ext} \max^2(0, c_i(\delta x_m, \delta y_m, p(j-1))) \right]$$

Avec : $y_d(j) = y_{ref}(j) - y_0(j) - e(j)$ et $e(k) = y_p(k) - \delta y_m(k) - y_0(k)$;

où $e(j) = e(k) \forall j \in [k+1, k+Np]$

Réalisation de l'approche prédictive, en simulation

➤ Poursuite de trajectoire : Sorties à réguler $Q(L, t)$ et $h(L, t)$

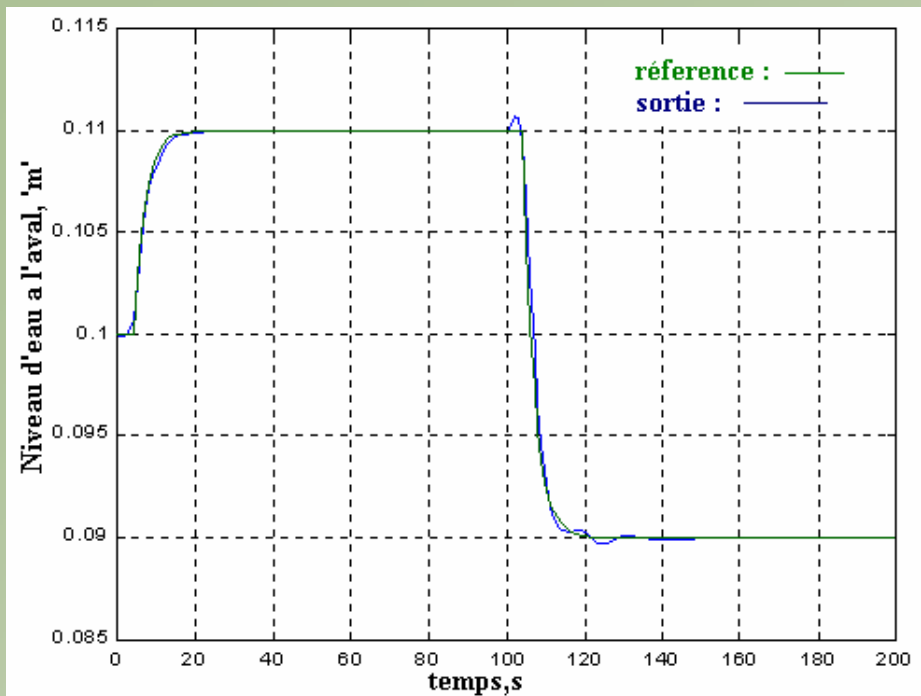


Figure11. Régulation du niveau d'eau à l'aval

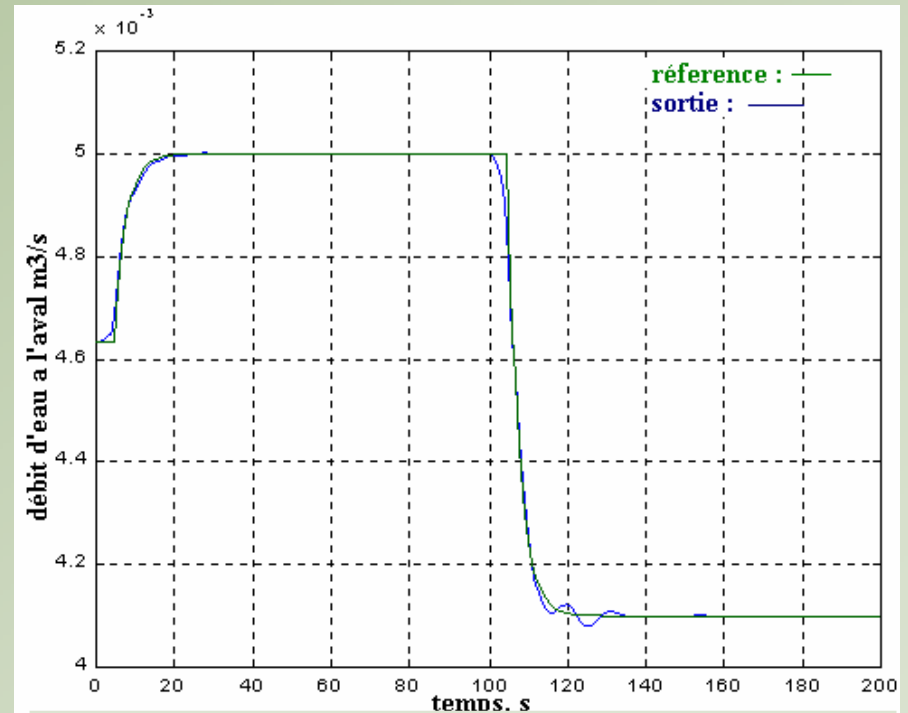


Figure12. Régulation du débit d'eau à l'aval

➤ Conclusion : la poursuite de la référence est quasi-exacte

Réalisation de l'approche prédictive, en simulation

- Prise en compte des contraintes : contraintes sur l'état $h(L/2, t)$ et sur la commande

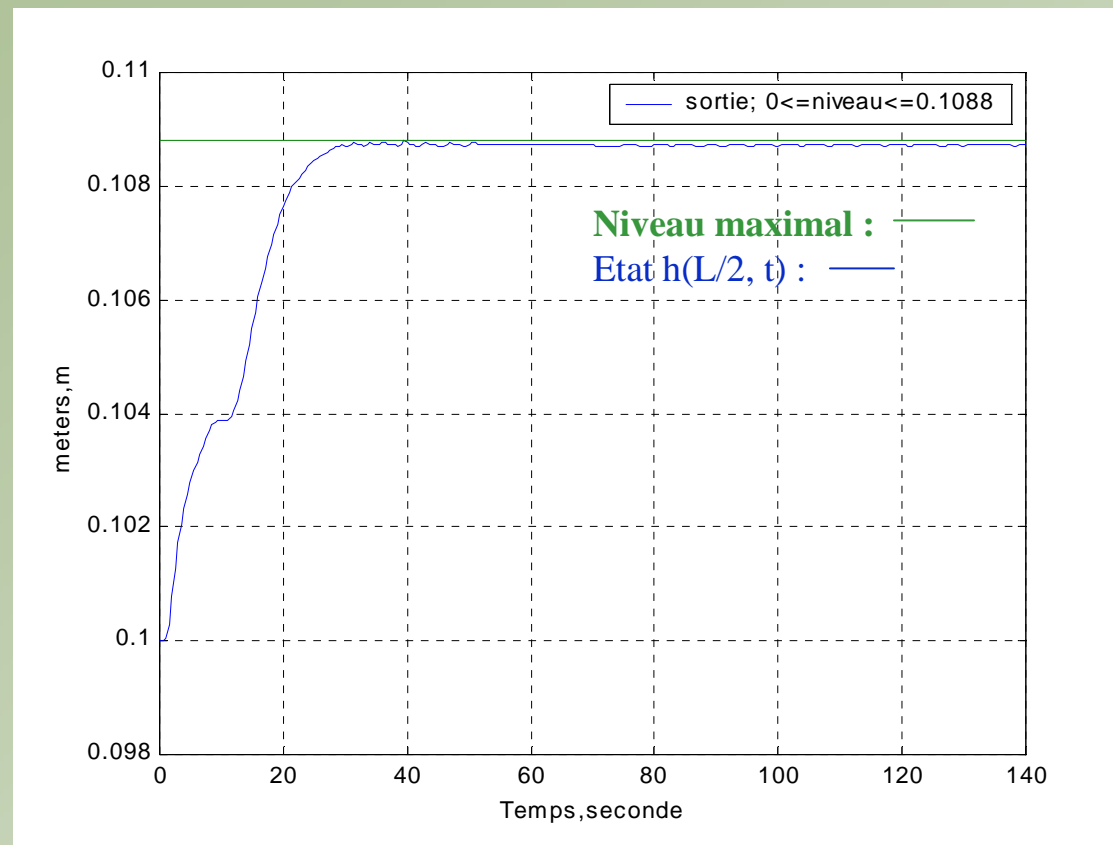


Figure13. Niveau d'eau au milieu du canal (état contraint)

- **Conclusion : les contraintes sur l'état sont vérifiées**

Réalisation de l'approche prédictive, en simulation

➤ Prise en compte des contraintes : contraintes sur la commande

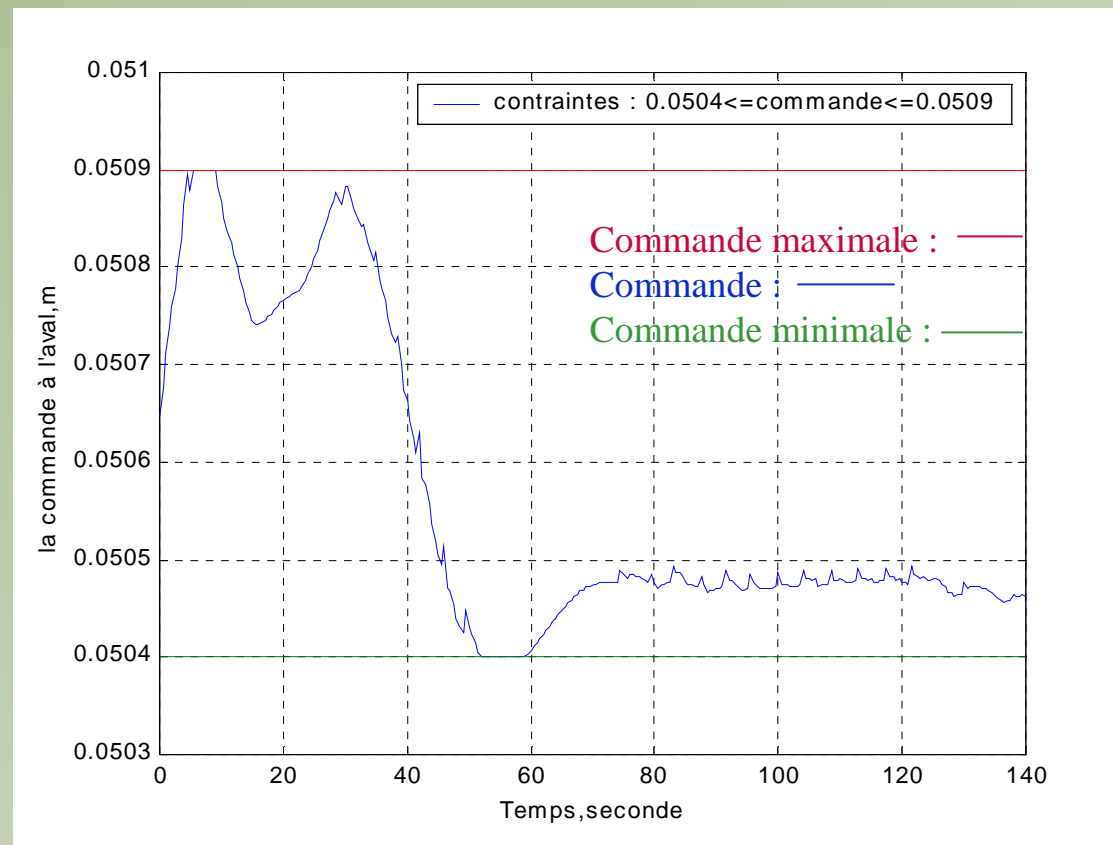


Figure14. Ouverture de la vanne à l'aval

➤ Conclusion : les contraintes sur la commande sont vérifiées

Conclusion & perspectives

Conclusion :

- La commande prédictive sous contraintes : Problème d'optimisation
- Résolution du problème d'optimisation : Levenberg-Marquardt
- Les résultats en simulation : La robustesse et l'efficacité

Très encourageants pour une validation expérimentale

Perspectives :

- Adaptation avec le logiciel qui pilote le micro-canal de Valence : programmation en C++
- Extension multi-bief

Bibliographie

- [1] H. Ouarit, L. Lefèvre, D. Georges. “*Réduction des systèmes à paramètres distribués, Application à la commande optimale robuste des canaux d’irrigation*”, thèse à l’institut nationale polytechnique de Grenoble, 2004.
- [2] Xavier Litrico, Vincent Fromion, “*Analytical approximation of open-channel flow for controller design*”, Applied Mathematical Modelling, 2004.
- [3] S. Chaussianand“ *Commande approchée de canaux à surface libre* ”, DEA à l’institut nationale polytechnique de Grenoble, 2003.
- [4] H. Ouarit, L. Lefèvre, D. Georges. “*Robust optimal control of one-reach open-channels*”, ECC, 2003.
- [5] J. de Halleux, C. Prieur, J.-M. Coron, B. d’Andréa-Novel, G. Bastin, “*Boundary feedback control in networks of open channels*’, Automatica, 39, 365 -1376, 2003.
- [6] Xavier Litrico, Didier Georges, “ *Automatique pour la gestion des ressources en eau*”, Hermes Science, 121-327, 2002.
- [7] S.Joe, Thomas A. Badgwell, “*A survey of industrial model predictive control technology*”, Control Engineering Practice, 11: 733-764, August 2002.
- [8] Manuel Gomez, José Rodellar, Juan A. Mantecon, “*Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals*”, Applied Mathematical Modelling, 26, 1039-1056, 2002.
- [9] Jean-François DULHOSTE, “ *contribution à la Commande non linéaire de systèmes d’irrigation*”, Thèse à l’institut nationale polytechnique de Grenoble, 2001.
- [10] Pascal Dufour, “*contribution à la commande prédictive des systèmes à paramètres repartis non linéaires*”, Thèse à l’université Claude Bernard Lyon1, 2000.
- [11] Coron J.M., D’Andrea-Novel B. et Bastin G. “*A Lyapunov approach to control irrigation canals modelled by Saint-Venant equations*”. European Control Conference ECC’99, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [12] Estelle Courtial, “*Commande prédictive et estimation d’état de systèmes non linéaires*”, Thèse à l’université Claude Bernard Lyon1, 1996.
- [13] Morari M, Zafiriou, “*Robust control*”,Dunod, 1983.

Je vous remercie de votre attention

***et
END***

me tiens à votre disposition

pour répondre à vos questions