HAL
open science

Une "commande sans modèle" pour aménagements hydroélectriques en cascade

Cédric Join, Gérard Robert, Michel Fliess

To cite this version:

Cédric Join, Gérard Robert, Michel Fliess. Une "commande sans modèle" pour aménagements hydroélectriques en cascade. Flash X - La revue scientifique de l'Ecole polytechnique, 2013, 15, pp.33-38. hal-00843678

HAL Id: hal-00843678

https://polytechnique.hal.science/hal-00843678v1

Submitted on 11 Jul 2013

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.

Une « commande sans modèle » pour aménagements hydroélectriques en cascade

Cédric JOIN[1], Gérard ROBERT[2], Michel FLIESS[3]
[1]INRIA – Non-A & CRAN, Université de Lorraine
UMR CNRS 7039
[2]EDF, Centre d'Ingénierie Hydraulique
[3]Laboratoire d'Informatique de l'X (LIX)
UMR CNRS 7161 CNRS-École polytechnique

On aborde, par la « commande sans modèle », la régulation du niveau d'eau dans un aménagement hydraulique, soumis à de fortes contraintes, pour produire de l'électricité. Les nombreuses simulations numériques fournissent d'excellents résultats, obtenus grâce à des algorithmes robustes et simples.

I. Introduction

La régulation du niveau d'eau dans un aménagement hydraulique (barrages, retenues, rivières, canaux,…), est non seulement importante pour la production d'énergie sous forme d'électricité, mais aussi pour la navigation, l'irrigation, et bien d'autres usages. Elle a reçu une attention considérable, qui a conduit à un grand nombre de publications universitaires employant les techniques les plus variées de l'automatique « moderne ». La difficulté tient à la nature même du procédé :

▶ c'est un système hydraulique d'écoulement à surface libre, enchaîné (voir Fig. 1) ou non, avec géométrie quelconque du volume d'eau ;

▶ sa taille est grande (plusieurs kilomètres de long) ;

▶ il est non linéaire, multivariable et distribué dans l'espace (équation aux dérivées partielles de Saint-Venant) ;

▶ il existe des perturbations aléatoires dont l'amplitude peut être importante, mais inconnue, dues à des apports ou prélèvements d'eau.

L'embarras croît encore si

▶ le niveau d'eau à réguler est éloigné de l'organe réglant (une vanne, par exemple), compte-tenu des retards variables mais aussi de phénomènes hydrauliques complexes de basculement des plans d'eau, en fonction du débit ;

▶ le cahier des charges exige une robustesse des performances sur toute la plage de fonctionnement et vis-à-vis des variations des caractéristiques de l'aménagement (temps de retard variables, superficie du réservoir variable en fonction du niveau et de l'envasement, usure des organes réglant,…).

On propose pour des aménagements hydroélectriques en cascade, séparés par des biefs (voir Fig. 1), la nouvelle « commande sans modèle », facile à mettre en œuvre, et éminemment robuste, dont nous rappelons l'essentiel au § II.

Après une description du dispositif et de sa régulation au § III, le § IV fournit d'excellentes simulations numériques, respectant plusieurs scénarios. Le § V conclut au grand intérêt pratique de notre approche, tout en mettant en doute la nécessité d'une modélisation mathématique de systèmes complexes pour les commander.

II. Rappels

A. Commande sans modèle et i-PID

La *commande sans modèle* repose sur une modélisation *locale*, sans cesse réactualisée, à partir de la seule connaissance du comportement entrée-sortie. A l'équation différentielle inconnue, linéaire ou non,

$$E(y, \dot{y}, \ldots, y^{(a)}, u, \dot{u}, \ldots, u^{(b)}) = 0 \qquad (1)$$

décrivant approximativement le comportement entrée-sortie, on substitue le modèle « phénoménologique », valable sur un court laps de temps,

$$y^{(\nu)} = F + \beta u \qquad (2)$$

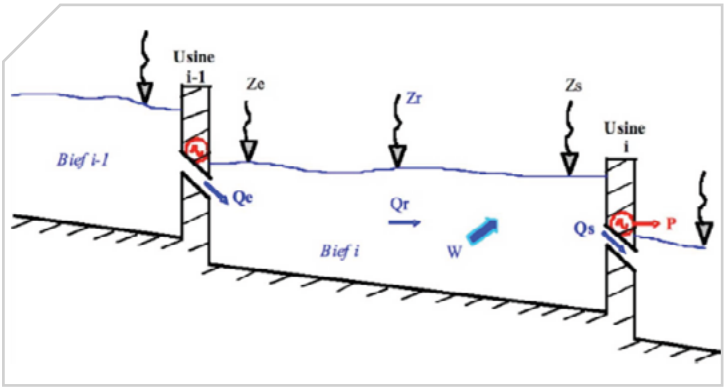


Figure 1 : Schéma d'un bief

$$a_1 = \frac{6\left(\int_{t_0}^{t} \tau x(\tau)\mathrm{d}\tau - \int_{t_0}^{t}\int_{t_0}^{\tau} x(\kappa)\mathrm{d}\kappa\mathrm{d}\tau\right)}{t^3} = \frac{6\left(\int_{t_0}^{t} \tau x(\tau)\mathrm{d}\tau - \int_{t_0}^{t} (t-\tau)x(\tau)\mathrm{d}\tau\right)}{t^3} = \frac{6\int_{t_0}^{t} \big(\tau x(\tau) - (t-\tau)x(\tau)\big)\mathrm{d}\tau}{t^3} \quad (5)$$

où

▶ l'ordre de dérivation ν, en général 1 ou 2, donc différent de l'ordre de dérivation a de y en (1), est fixé par l'opérateur ;

▶ le paramètre constant β est fixé par l'opérateur de sorte qu'en (1) βu et $y^{(\nu)}$ aient même ordre de grandeur.

La valeur de F à chaque instant se déduit de celles de u et de $y^{(\nu)}$, obtenus par dérivateurs numériques. On obtient le comportement désiré, si, par exemple, $\nu = 2$ en (2), grâce

au *correcteur PID intelligent*, ou, en abrégé, $i\text{-}PID$,

$$u = -\frac{F}{\beta} + \frac{\ddot{y}^*}{\beta} + K_P e + K_I \int e + K_D \dot{e} \quad (3)$$

où

▶ y^* est la trajectoire de référence de la sortie, obtenue selon les préceptes de la commande par platitude ;

▶ $e = y - y^*$ est l'erreur de poursuite ;

▶ K_P, K_I, K_D sont les gains de réglage.

Remarque 1 : Il est aisé de déterminer ces gains car, avec (3), (2) *se ramène, contrairement aux PID classiques, à un intégrateur pur du second ordre.*

B. Dérivateurs numériques

B.1 Un calcul simple

Avec les notations classiques du calcul opérationnel, il correspond à $p(t) = a_0 + a_1 t,\ a_0, a_1 \in \mathbb{R}$, pour $t \geq 0$:

$$P(s) = \frac{a_0}{s} + \frac{a_1}{s^2} \quad (4)$$

On cherche à éliminer a_0 car on veut estimer a_1. Pour cela on multiplie (4) par s :

$$sP(s) = a_0 + \frac{a_1}{s}$$

puis on dérive l'expression obtenue par rapport à s pour supprimer a_0 :

$$P(s) + s\frac{\mathrm{d}P(s)}{\mathrm{d}s} = -\frac{a_1}{s^2}.$$

Avant de revenir au domaine temporel, une multiplication par s^{-N}, avec $N > 1,\ N = 2$ par exemple, est nécessaire pour obtenir uniquement des intégrales :

$$s^{-2}P(s) + s^{-1}\frac{\mathrm{d}P(s)}{\mathrm{d}s} = -s^{-4}a_1.$$

On revient au domaine temporel en rappelant que $\frac{d}{ds}$ correspond à la multiplication par $-t$:

B.2 Filtres dérivateurs

Les propriétés du calcul opérationnel permettent de généraliser (5) en écrivant tout estimateur algébrique d'une dérivée d'ordre quelconque d'un signal x (t), analytique autour de 0, sous la forme d'un filtre $\int_{t_1}^{t_n} \varpi(t)x(t)\mathrm{d}t$, où $\varpi(t)$ est un polynôme temporel caractérisant ledit estimateur.

Les calculs du § II-B.1 permettent de comprendre la variété possible d'estimateurs que l'on peut obtenir par cette méthode, en modifiant, par exemple, l'ordre de troncature du développement de Taylor.

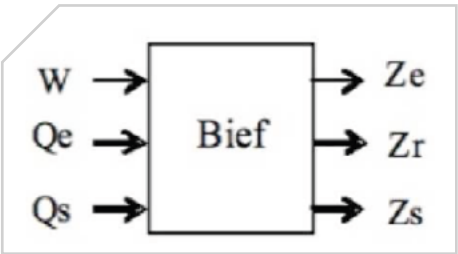


Figure 2 : Schéma bloc du modèle

III. Description du dispositif

A. Généralités

Comme l'indiquent les schémas 1 et 2, on cherche à maîtriser le niveau d'eau z_r du bief i, entre les usines i – 1 et i, avec

▶ commande u, ou débit de sortie Q_s, échantillonnée bloquée et saturée en position et vitesse ;

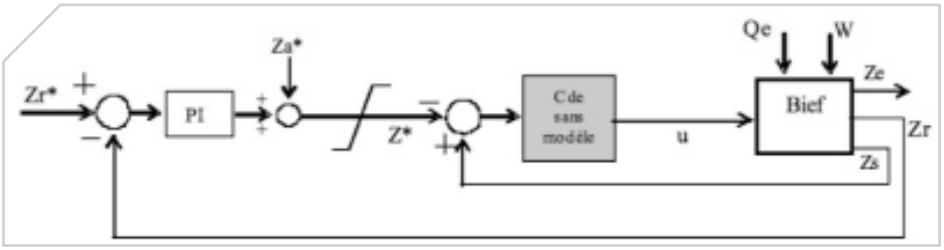


Figure 3 : Schéma bloc de la commande désirée

▶ deux entrées exogènes Q_e et W, perturbatrices ;

▶ insensibilité du capteur de niveau qui a une résolution de 1 cm.

La Fig. 3 fournit le schéma de commande

B. Traitement du retard

Le débit Q_e modifie le niveau z_r, loin de l'usine i, avec un retard mal connu et, qui plus est, variable, donc difficile, sinon impossible, à maîtriser avec les outils théoriques actuels d'identification et de commande. On y pallie en reconstruisant un niveau z_a à partir de mesures proches de l'usine $i-1$, par deux lois possibles :

▶ l'une repose sur la connaissance de niveaux

$$z_a = f(Z_e)$$

- l'autre sur celle du débit entrant

$$z_a = g(Q_e)$$

fournies par EDF et qui résultent de lois empiriques.

La trajectoire de référence, intermédiaire, $z_a^\star$, déterminée selon les principes de la platitude, est complétée par un correcteur piloté par l'erreur de poursuite sur z_r. Nous réalisons, ainsi, une *replanification* en ligne automatique de la trajectoire de référence. Cette trajectoire corrigée $z^\star$ devient la consigne d'une boucle interne, à commande sans modèle.

C. Commande sans modèle

Nous mettons ici en œuvre (2), avec $\nu = 1$, sous la forme

$$\alpha\dot{y} = F - u \qquad (6)$$

qui a l'avantage de donner un sens clair de débit entrant à F, information importante pour l'exploitation de la centrale hydraulique, en faisant apparaître la différence $F - u$, où u est le débit sortant. La boucle est fermée, d'après (3), par $u = F - \alpha\dot{y}^\star + \alpha\mathrm{PI}(e)$ où $\mathrm{PI}(e) = K_P e + K_I \int e$ est un correcteur PI, piloté par $e = y - y^\star$.

IV. Quelques résultats de simulation

A. Scénarios

Trois scénarios, proposés par EDF sur l'aménagement hydroélectrique de Fessenheim, permettent d'evaluer les performances de notre commande. Cet aménagement au fil de l'eau (capable de turbiner 175, 5 MW en pointe) fait partie des 10 centrales EDF (avec sa filiale EnBW) enchaînées en cascade sur le Rhin et régulées en niveau. Il est caractérisé par un bief de 15 kilomètres de long et d'une hauteur de chute d'environ 15 mètres. Le principal objectif à satisfaire est le respect de la contrainte en un point distant de 7,5 kilomètres de l'actionneur.

$$z_r^\star - 10 \text{ cm} < z_r < z_r^\star + 10 \text{ cm} \qquad (7)$$

1. Le premier scénario représente la fin d'une crue avec de fortes variations de débit.

2. Le second, plus doux, correspond à une situation normale plus fréquente ;

3. Quant au troisième, il est académique afin de mettre en lumière les comportements lors de saturations.

Les scénarios 1 et 2, qui sont tout à fait réalistes, ont une durée de 4 jours. Les figures peuvent donner l'illusion, donc, d'une commande très dynamique, ce qui n'est pas vraiment le cas.

Les perturbations sont constituées, d'une part, par un biais égal à 0.03Q_e + 10 pour prendre en compte les erreurs de débit (consigne - mesure) et, d'autre part, par des sassées de 100 m³/s, reproduisant le comportement d'une écluse.

Ces dernières sont très violentes puisqu'elles ne durent que 15 minutes, c'est-à-dire 7 échantillons.

B. Réglage de la boucle externe

Nous avons rencontré des difficultés à régler le correcteur de la boucle externe car seule une méthode empirique est applicable. Nous avons respecté la règle classique stipulant que la dynamique du correcteur de la boucle externe est moins rapide que la boucle interne.

C. Commande échantillonnée bloquée à 2 minutes

Les Figures 4 et 5 présentent les résultats obtenus dans le cas où la commande est bloquée toutes les 2 minutes, en respectant les différents scénarios. Aucune contrainte n'est violée : le contrat est rempli !

Remarque 4 : Nous avons repris ces mêmes simulations en augmentant la fréquence d'échantillonnage, en passant à 1 minute. On améliore considérablement (7) *en obtenant :*

$$z_r^\star - 5 \text{ cm} < z_r < z_r^\star + 5 \text{ cm}.$$

D. Anti-emballement

Un anti-emballement, ou *anti-windup*, est mis en place sur chaque boucle de régulation (boucles interne et externe). C'est pourquoi, sur la Figure 6, la commande et la replanification de z^* décroissent immédiatement après la diminution du débit d'entrée Q_e.

E. Consigne anticipée

Il est, bien sûr, possible d'anticiper la consigne de z_r : ceci revient à prévoir les changements de consigne et à les appliquer, afin de considérer le temps séparant l'évolution de z de son effet sur z_r. Afin de ne pas masquer les résultats de la régulation proposée, cette idée n'est pas mise en œuvre ici. De fait, on voit apparaître, dans la commande à 2 minutes, un retard d'environ 45 minutes que nous pourrions largement atténuer.

V. Conclusion

La stratégie proposée possède de nombreux avantages :

▶ Le retard, cause d'instabilité dans bien des lois de commande, est écarté grâce à des redondances analytiques approximatives, déduites de la physique du bief. Les erreurs, qui en résultent, sont corrigées par une boucle externe de régulation. Une nouvelle trajectoire de référence est calculée à chaque instant pour le niveau aval.

▶ On tire toujours profit de la grande réactivité de la commande sans modèle dans la boucle interne, qui assure ainsi la poursuite de la trajectoire sans connaître le modèle du bief.

Par ses propriétés de robustesse, d'adaptabilité et de simplicité, la commande sans modèle apporte des performances remarquables avec un temps de mise au point très court, comparé aux systèmes avancés de commande, que ce soit en étude de simulation ou sur site. Elle semble donc particulièrement adaptée au milieu industriel.

L'algorithme de commande proposé est innovant dans le domaine de la régulation de niveau des canaux découverts.

Les performances obtenues en poursuite, en rejet de perturbations, et en robustesse sont remarquables, compte tenu de la sévérité des scénarios de simulation appliqués. Le fait de maintenir le niveau au point milieu du bief - soit à 7,5 kilomètres de l'actionneur - dans une bande de ± 10 centimètres, avec des perturbations inconnues, relève en effet d'une vraie prouesse. La commande sans modèle appliquée à la régulation de niveau constitue une régulation industrielle non seulement en raison des performances atteintes mais aussi, et surtout, pour ses qualités intrinsèques, peu communes en régulation tant théorique qu'industrielle :

▶ facilité de mise en œuvre (structure de type PID *feed forward*),

▶ faible sollicitation de la charge du calculateur,

▶ temps de mise au point réduit, grâce, notamment, au faible nombre de paramètres à régler[1],

▶ auto-adaptation par rapport aux variations du procédée,

▶ maintenance aisée, grâce à un algorithme très simple.

L'intérêt pour le producteur hydraulique EDF est de disposer d'une commande capable de réguler un niveau proche ou distant du vannage (organe réglant), tout en garantissant les performances désirées sur toute la plage de fonctionnement de l'usine hydroélectrique, malgré la présence de perturbations imprévisibles. Ces atouts permettront certainement de réduire les coûts des projets de construction ou de rénovation d'installations hydrauliques, en diminuant la durée des essais de mise en service.

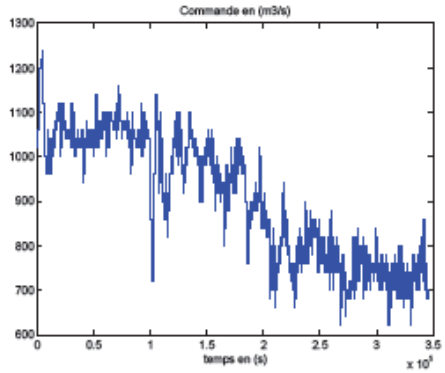
Terminons en soulignant que ce traitement des installations hydroélectriques, comme bien d'autres mises en œuvre pratiques de la commande sans modèle, pose une question épistémologique fondamentale en mathématiques appliquées : quelle importance convient-il d'accorder vraiment pour la commande d'une machine « complexe » à une modélisation mathématique « soigneuse » ? On ne doit pas comprendre cette remise en question de la modélisation comme un déni de toute considération théorique, en particulier mathématique, bien au contraire ! mais comme une contribution à la recherche de concepts et d'outils plus adéquats.

[1] Cinq si l'on fait la somme des paramètres en (2) et (3). Si l'on part de (6), on n'a plus, comme ici, que trois paramètres à choisir. Le calibrage devient trivial car les gains de l'i-PI servent, d'après la remarque 1, à réguler un intégrateur pur du premier ordre.

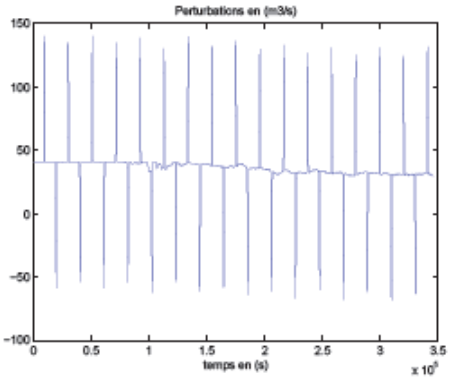
Contact :
Michel Fliess
michel.fliess@polytechnique.edu

Complément & remerciements
Les lignes qui précèdent adaptent, en la simplifiant, une présentation, due aux trois mêmes auteurs, à la 6e Conférence Internationale d'Automatique Francophone (CIFA), tenue à Nancy en juin 2010. Le lecteur intéressé la trouve en accès libre, grâce au lien http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00460912. Ajoutons que le lien http://hal-polytechnique.archives-ouvertes.fr/hal-00581109/fr/fournit un rapport général sur le sans-modèle, écrit pour doctorants et chercheurs débutants, ainsi qu'une liste des principaux succès concrets jusqu'au printemps 2011. En 2012 le numéro 14 de cette même revue, FlashX, a déjà consacré un article à l'emploi de la commande sans modèle pour la régulation du trafic autoroutier.
Ce travail a été effectué sous l'égide de deux contrats, intitulés « Commande sans modèle pour aménagements hydroélectriques en cascade », entre, d'une part, EDF et, d'autre part, l'École polytechnique, l'INRIA

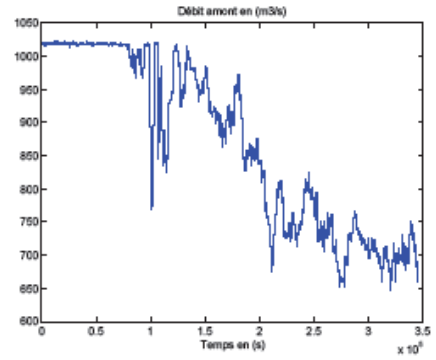
et le CNRS. Le système de régulation, qui y est décrit, a fait l'objet d'une demande de brevet, déposée par EDF et l'École polytechnique en décembre 2008. Accepté, ce brevet a été étendu à plusieurs pays étrangers. Il a aussi reçu le prix de l'innovation (catégorie brevet) décerné par l'École polytechnique en 2010.



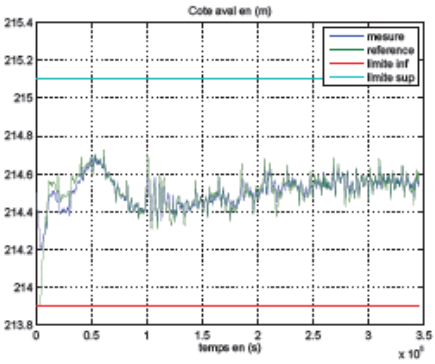
(a) Débit amont



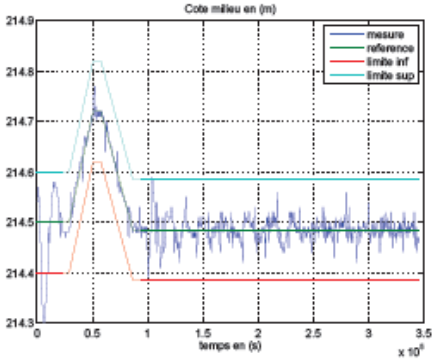
(b) Perturbations : biais et sassées



(c) Commande z

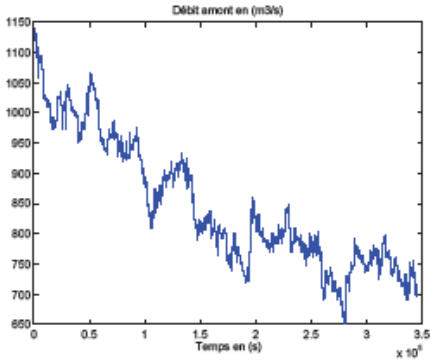


(d) Poursuite de z_r

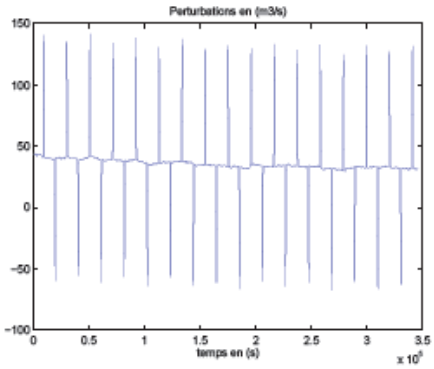


(e) Poursuite de z_r

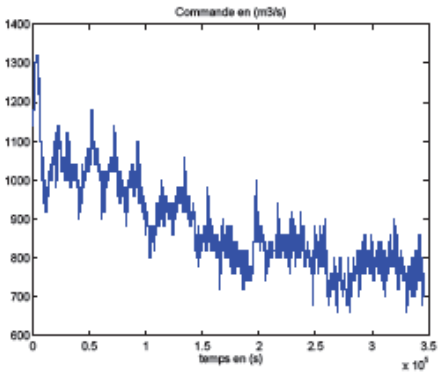
Fig. 4 : Scénario 1 avec poursuite et rejet de fortes perturbations : période de 2 minutes



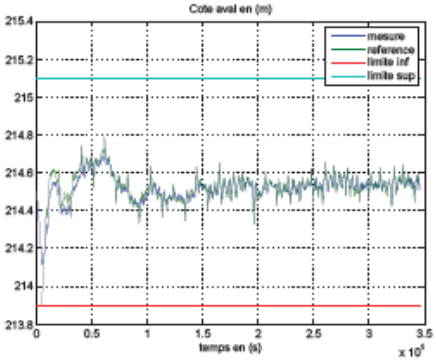
(a) Débit amont



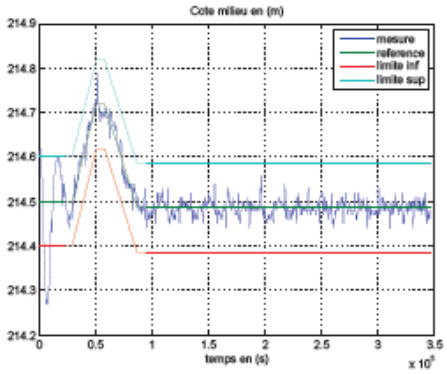
(b) Perturbations : biais et sassées



(c) Commande

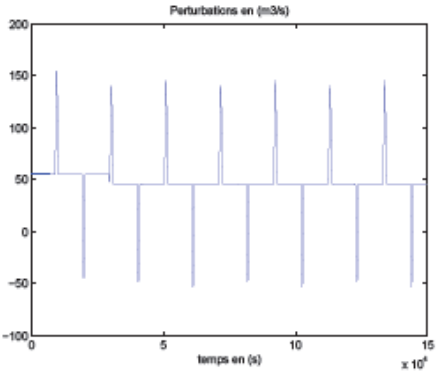


(d) Poursuite de z_r

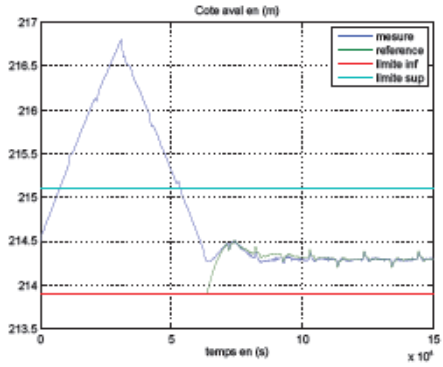


(e) Poursuite de $\mathcal{Z}_{\mathbf{r}}$

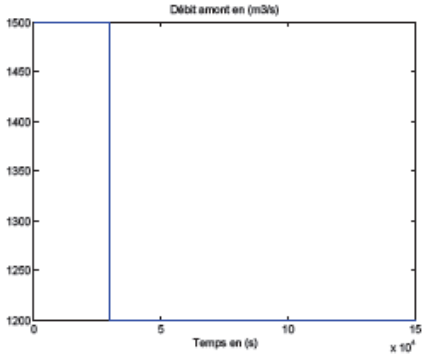
Fig. 5 : Scénario 2 avec poursuite et rejet de perturbations assez lentes : période de 2 minutes



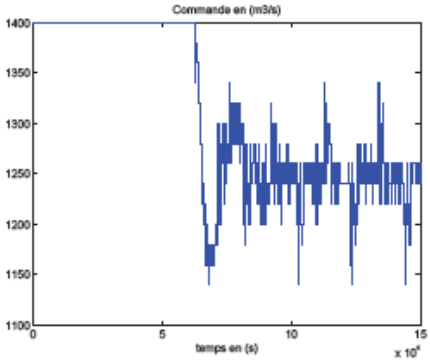
(b) Perturbations : biais et sassées



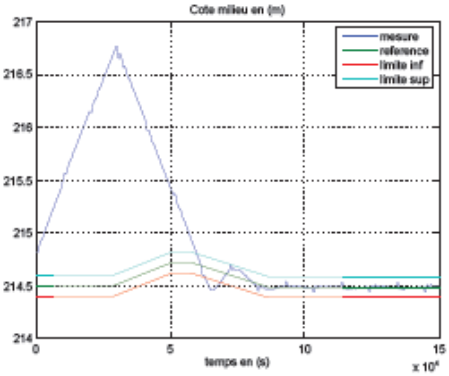
(d) Poursuite de $\mathcal{Z}_{\mathbf{r}}$



(a) Débit amont



(c) Commande



(e) Poursuite de $\mathcal{Z}_{\mathbf{r}}$

Fig. 6 : Scénario 1 avec poursuite et rejet de perturbations avec actionneur saturé : période de 2 minutes