



HAL
open science

Observation et commande par retour d'état d'un procédé de bacs communicants

Ahmad Hably, Jonathan Dumon

► **To cite this version:**

Ahmad Hably, Jonathan Dumon. Observation et commande par retour d'état d'un procédé de bacs communicants. CETSIS 2011 - 9ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, Oct 2011, Trois-Rivières, Québec, Canada. hal-00631726

HAL Id: hal-00631726

<https://hal.science/hal-00631726>

Submitted on 13 Oct 2011

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.

Observation et commande par retour d'état d'un procédé de bacs communicants

Ahmad Hably
Ahmad.Hably@grenoble-inp.fr
Grenoble-INP, ENSE3
BP 46, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

Jonathan Dumon
Jonathan.Dumon@grenoble-inp.fr
Département Automatique, GIPSA-lab
BP 46, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

Abstract—Cet article présente une maquette pédagogique composée des trois bacs communicants. Une approche basée sur la représentation d'état est développée pour observer et asservir les niveaux d'eau dans les trois bacs. Les résultats sont validés en simulation et en pratique.

I. INTRODUCTION

La plate-forme automatique, procédés et commande (AIDA) est une plate-forme enseignement-recherche de l'école d'ingénieur Ense3 (Énergie, Eau et Environnement) qui s'appuie sur le département automatique du laboratoire Gipsa-Lab. Cette structure permet de maintenir un lien permanent entre l'enseignement et la recherche au travers des enseignants chercheurs, doctorants et personnels techniques du laboratoire et par le transfert de procédés expérimentaux vers l'enseignement [1]. C'est une plate-forme des métiers de la commande (modélisation, régulation et surveillance, en simulation et en temps réel). Elle comprend divers dispositifs expérimentaux pour l'enseignement et la mise en œuvre pratique des méthodologies de l'automatique. Les bancs d'expérimentations de la plate-forme illustrent différents procédés (électromécaniques, thermiques et hydrauliques) et permettent de pratiquer les techniques de modélisation et d'identification, comme de mettre en œuvre différents algorithmes d'observation et de commande.

Dans cet article, nous allons présenter la maquette des bacs communicants (figure 1) et l'organisation des travaux pratiques autour de cette application pédagogique. Ce TP rentre dans le cycle de formation des élèves en deuxième année d'Ense3. Dans la section II, nous présentons le dispositif expérimental et ses différentes composantes électriques et mécaniques. Ensuite la partie travail à domicile demandée aux élèves pour préparer des modèles non linéaire et linéaire associés au procédé est présentée en section III. Dans la section IV, nous présentons les résultats en simulation sur Matlab-Simulink de la conception d'un observateur, le développement d'une commande par retour d'état, et l'étude de performance de cet observateur-commande. Une mise en application en temps réel sur le procédé est présentée en section V. Dans chaque section, nous allons présenter l'ampleur et la durée du travail demandé et les compétences que l'on cherche à faire acquérir aux apprenants. L'article se terminera par une conclusion et un retour d'expérience des étudiants.

II. PRÉSENTATION DU PROCÉDÉ

La maquette est composée de :

- Trois bacs communicants
- Une partie électrique
- L'informatique associée

A. Les bacs communicants

Le procédé est constitué de trois bacs connectés selon la figure 2. Le premier bac est alimenté par un débit noté q_e ,



Fig. 1. Procédé : Régulateur de débit avec les trois bacs communicants.

délivré par une vanne régulée en débit, dont on pilote la consigne.

Les trois bacs, de section effective¹ S_i , communiquent entre eux à travers des orifices de diamètre d_i , de section ϕ_i et de coefficient de débit α_d .

Deux sorties de diamètre d_{si} et de section ϕ_{si} sont réalisées. On note de plus x_i la hauteur du liquide dans chaque bac i , et p_i une perturbation de débit qui peut affecter chacun de ces bacs.

On a naturellement :

$$x_1 \geq x_2 \geq x_3$$

En pratique, les sections ϕ_i des orifices d'écoulement correspondent aux diamètres suivants : $d_1 = 7,2$

1. i.e. qui tient compte de la réalisation technologique des bacs, et notamment la présence de trop-plein pour chacun d'eux.

mm, $d_2 = 5,4$ mm, $d_{s2} = d_{s3} = 3,5$ mm. En outre, les sections effectives des bacs sont identiques ($S_1 = S_2 = S_3 = 1,3 \cdot 10^{-3} m^2$) et le coefficient de débit est donné par : $\alpha_d = 0,72 \text{ sec}^{-0,5}$. Le débit d'équilibre q_e est choisi ici à $q_e = 100 \text{ L/h}$. Le débit maximum réalisable sur la maquette est de 140 L/h .

On peut noter que q_e et (S_1, S_2, S_3) sont les facteurs qui jouent sur le temps de réponse du système. L'eau du procédé n'étant pas récupérée, on cherchera donc plutôt à réduire (S_1, S_2, S_3) pour que le temps de stabilisation de l'expérience soit compatible avec une séance de TP de quatre heures. Le procédé étant très sensible aux diamètres (d_1, d_2, d_{s2}, d_{s3}), on cherchera à réduire la longueur des conduits correspondants pour éviter l'accumulation de bulles qui viennent modifier ces grandeurs.

B. La partie électrique

Les hauteurs (x_1, x_2, x_3) sont obtenues par mesure de la pression au fond de chaque bac. Pour se faire, on y plonge un long tube dont l'extrémité qui se situe au fond du bac est biseauté pour éviter la stagnation d'eau (ce qui peut fausser la mesure). L'autre extrémité qui ressort légèrement du bac est reliée par un tuyau flexible au capteur de pression. Les 3 capteurs de pression sont connectés aux entrées analogiques du PC.

Pour piloter le débit, on dispose d'une vanne proportionnelle électrique et d'un débit-mètre à impulsion. Un PID local effectue la régulation du débit. Un interrupteur permet de sélectionner si la consigne de ce régulateur provient d'un potentiomètre en façade ou de la sortie analogique du PC. Le PID est réalisé par une carte électronique fabriquée en interne mais qui pourrait aujourd'hui être remplacée par un PID industriel classique.

Les mesures des hauteurs sont conditionnées de 0 à 10 V pour des variations de 0 à 50 cm, et le débit entrant, conditionné de 0 à 10 V pour des variations de 0 à 200 L/h.

C. L'informatique associée

L'informatique associée est constituée de :

- 1) Sur le plan matériel
 - 1 PC de développement équipé de cartes E/S de type Advantech PCI-1710 [2]
- 2) Sur le plan logiciel :
 - une licence Matlab, Simulink, Real-Time Windows target [3]. Cet environnement permet de compiler le schéma Simulink utilisé en temps-réel et de piloter la carte E/S.

Cette architecture permet de faire les simulations et les expérimentations sur le même PC et de manière très rapide, le tout pour un coût relativement limité. L'inconvénient est que l'on peut difficilement faire des expériences à moins de 50 ms de temps d'échantillonnage, ce qui reste tout à fait adapté à la plupart des procédés hydrauliques, thermiques et mécaniques des maquettes pédagogiques utilisées.

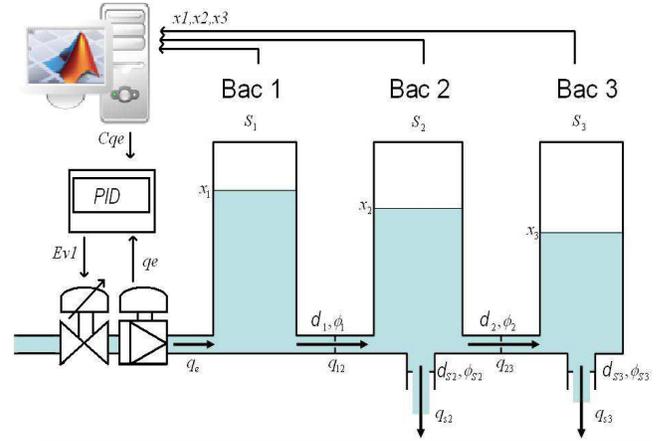


Fig. 2. Bacs communicants.

III. PRÉPARATION

La partie "préparation" demandée aux élèves est estimée à 2 heures. Dans un premier temps, ils développent un modèle non linéaire du procédé. Ensuite, ils calculent un modèle linéaire autour d'un point d'équilibre pour la conception de l'observateur et de la commande par retour d'état.

A. Le modèle non linéaire

On établit le bilan des débits entrant et sortants pour chacun des bacs. On obtient alors un modèle non linéaire d'ordre 3.

$$\begin{cases} S_1 \frac{dx_1(t)}{dt} = q_e(t) - q_{12}(t) \\ S_2 \frac{dx_2(t)}{dt} = q_{12}(t) - q_{s2}(t) - q_{23}(t) \\ S_3 \frac{dx_3(t)}{dt} = q_{23}(t) - q_{s3}(t) \end{cases} \quad (1)$$

Nous exprimons le débit sortant d'un bac i vers un bac j en fonction des différences entre les hauteurs d'eau en amont et en aval par la relation de Bernoulli suivante :

$$q_{ij} = a_{ij} \sqrt{\Delta x} \quad (2)$$

avec a_{ij} dépendant de la section ϕ et du coefficient de débit moyen α_d de la réalisation :

$$a_{ij} = \alpha_d \phi \sqrt{2g}$$

Nous considérons la hauteur d'eau du troisième bac comme étant la sortie du système. Nous avons donc un système dynamique de la forme :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, q_e)$$

avec

$$f(x, q_e) = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_1} (q_e(t) - a_{12} \sqrt{x_1 - x_2}) \\ \frac{1}{S_2} (a_{12} \sqrt{x_1 - x_2} - a_{s2} \sqrt{x_2} - a_{23} \sqrt{x_2 - x_3}) \\ \frac{1}{S_3} (a_{23} \sqrt{x_2 - x_3} - a_{s3} \sqrt{x_3}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

La sortie du système est : $y(t) = x_3(t)$.

B. Le modèle linéaire

Dans cette partie les élèves calculent un modèle linéaire à partir du modèle trouvé dans la section précédente. Le système est au point d'équilibre pour

$$q_e = q_{ee} = 100 \text{ L/h} = 2,78.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

et pour

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \frac{dx_3}{dt} = 0$$

Ce qui nous donne pour point d'équilibre :

$$\begin{cases} x_{10} = \left(\frac{q_{ee}}{a_{12}}\right)^2 + x_{20} \\ x_{20} = q_{ee}/(a_{S_2}^2 + a_{S_3}^2\beta + 2a_{S_2}a_{S_3}\sqrt{\beta}) \\ x_{30} = \beta x_{20} \end{cases} \quad (4)$$

avec $\beta = \frac{a_{23}^2}{a_{S_3}^2 + a_{23}^2}$.

Nous avons bien $50\text{cm} > x_{10} = 0.2606\text{m} > x_{20} = 0.2148\text{m} > x_{30} = 0.1803\text{m}$.

Nous obtenons une représentation d'état autour de ce point d'équilibre avec $u = \Delta q_e$

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x(t)}{dt} = A\Delta x(t) + B\Delta u(t) \\ \Delta y(t) = C\Delta x(t) + D\Delta u(t) \end{cases}$$

avec

$$\begin{aligned} A &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_{i0}, q_{ee}}, & B &= \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x_{i0}, q_{ee}} \\ C &= \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x_{i0}, q_{ee}}, & D &= \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_{x_{i0}, q_{ee}} \end{aligned}$$

Pour le procédé Bacs-observateur de la plate-forme AIDA, nous avons :

$$A = \begin{bmatrix} -0,2415 & 0,2415 & 0 \\ 0,2415 & -0,4244 & 0,1566 \\ 0 & 0,1566 & -0,1865 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 795,7747 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

avec $C = [1 \ 0 \ 0]$ et $D = [0]$. Les pôles du système en boucle ouverte sont stables avec les valeurs numériques suivantes :

$$P_{sys} = [-0.6299 \ -0.2046 \ -0.0180]$$

IV. SIMULATION

Dans cette partie, nous demandons aux élèves de construire un observateur en utilisant la sortie du système x_3 et l'entrée u . Les élèves doivent alors choisir les pôles de l'observateur en comparant plusieurs valeurs en simulation. Cet observateur sera ensuite combiné avec une commande par retour d'état. Les élèves testent en simulation les performances de cette commande en asservissement pour une consigne de référence et en régulation lors de l'introduction d'une perturbation (en entrée ou en sortie). La durée de cette partie est estimée entre quatre et six heures.

A. LA CONSTRUCTION D'UN OBSERVATEUR DU SYSTÈME

Le rang de la matrice d'observabilité est 3. Le système est donc observable, ce qui signifie que l'état complet du système peut être reconstitué à partir de notre connaissance de l'entrée et de la seule mesure de la hauteur d'eau du bac 3. L'observateur est corrigé par un terme additif correspondant à l'écart entre la sortie estimée $C\hat{X}$ et la sortie réelle y . K correspond au gain de correction [4]. Soit :

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Bu + K(y - C\hat{X}) \quad (7)$$

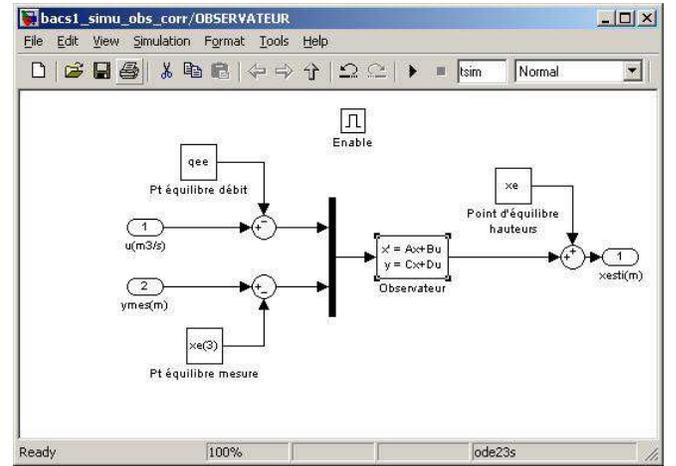


Fig. 3. La structure de l'observateur avec $A_{obs} = A - BK$ et $B_{obs} = [B \ K]$. Les conditions initiales d'observateur sont 110% du point d'équilibre

Le gain de l'observateur K est choisi tel que l'observateur soit plus rapide que le système en boucle ouverte. Plusieurs cas ont été testés en simulation où l'on a utilisé le modèle non-linéaire pour simuler le procédé. Nous voulons avoir un observateur rapide au niveau de la convergence et robuste vis-à-vis des perturbations sur la mesure. Les pôles d'observateur qui satisfont cet objectif dans notre cas sont² :

$$P_o = 2 * [-0.6299 \ -0.6299 \ -0.6299] \quad (8)$$

Les erreurs d'estimation sont tracées sur la figure 4. Nous obtenons un temps de convergence raisonnable de 7 secondes.

2. On a choisit un multiple du pôle stable rapide du système en boucle ouverte

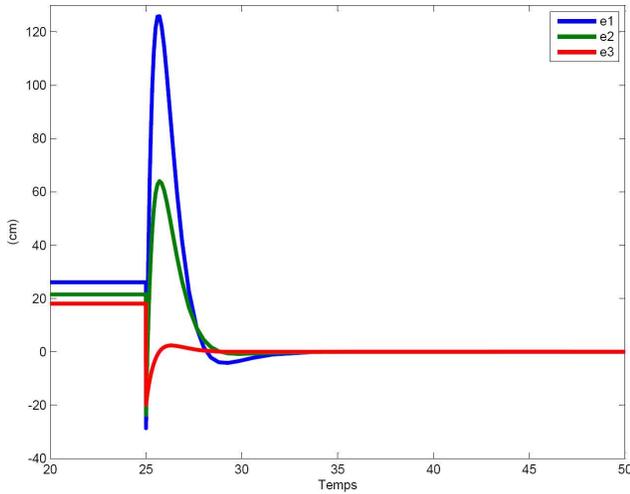


Fig. 4. Les erreurs d'estimation sur les niveaux d'eau

Dans la section suivante cet observateur sera couplé avec une commande par retour d'état.

B. LA COMMANDE PAR RETOUR D'ETAT

Pour la conception de la commande par retour d'état, il est demandé de tester la matrice de commandabilité. Le système est commandable parce que le rang de cette matrice est 3. Il est donc possible d'obtenir n'importe quel régime de fonctionnement de notre état, à partir de la commande en débit d'alimentation du bac 1.

Les pôles en boucle fermée seront fixés de manière à respecter cette condition mais aussi en essayant d'atteindre les performances désirées. Les pôles du système en boucle fermée qui permettent d'accélérer raisonnablement le système sans dépasser les limites sur le débit d'entrée sont :

$$P_c = [-0.6299 \quad -0.6299 \quad -0.6299]/3 \quad (9)$$

Les élèves doivent tester deux types de commande par retour d'état :

- sans l'action intégrale
- avec l'action intégrale

Dans les deux cas, un échelon de consigne de 2 cm pour le troisième bac est appliqué à l'instant $t_1 = 50 \text{ sec}$ suivi d'une perturbation constante sur le débit d'entrée de 10 L/h à l'instant $t_2 = 200 \text{ sec}$ et une perturbation sur x_3 d'1 cm à l'instant $t_3 = 400 \text{ sec}$.

La structure de la commande par retour d'état sans l'action intégrale est représentée sur la figure 5 et l'évolution du niveau d'eau dans les trois bacs est tracée sur la figure 6. Nous obtenons un temps de réponse à 95 % de 13 sec avec une erreur statique nulle. Nous remarquons dans ce cas-là que la perturbation sur l'entrée et la perturbation sur la sortie ne sont pas rejetées.

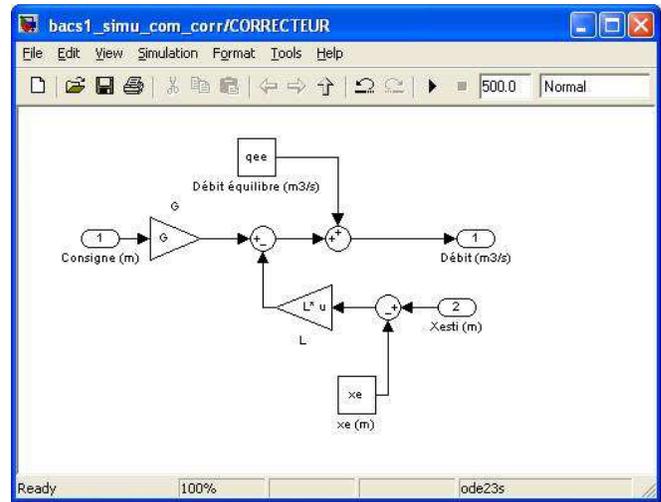


Fig. 5. Structure de la commande par retour d'état sans l'action intégrale avec $L = 10^{-3}[-0.2796 \quad 0.6470 \quad -0.1360]$ et $G = 3.0762 * 10^{-4}$

Afin d'améliorer la performance de la commande, les élèves réalisent un correcteur par retour d'état avec une action intégrale (figure 7). La réponse du système est tracée sur la figure 8. La perturbation sur le débit d'entrée du bac 1 est rejetée en 40 sec environ et la perturbation sur x_3 est rejetée en 49 sec environ.

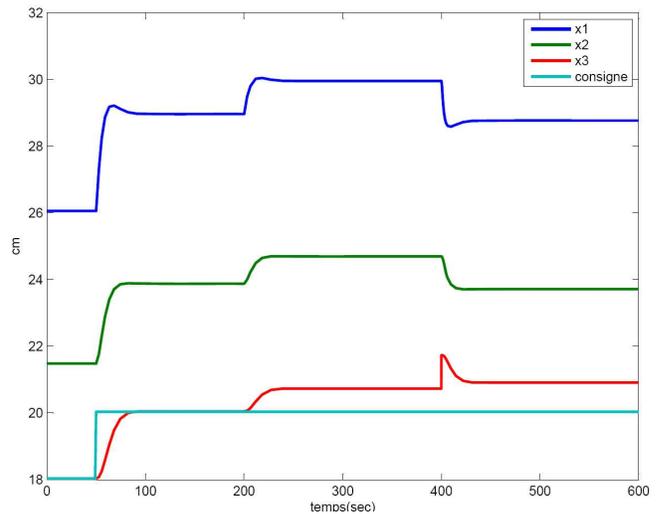


Fig. 6. Réponse du système bouclé avec la commande par retour d'état sans l'action intégrale

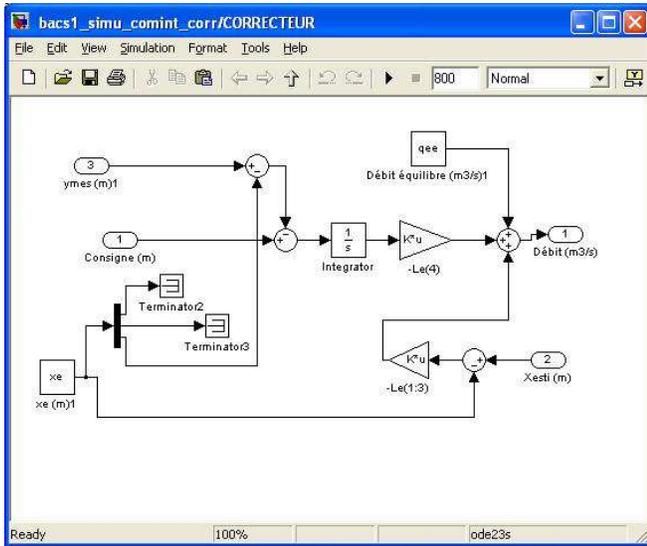


Fig. 7. Structure de la commande par retour d'état avec l'action intégrale et $L_e = 10^{-3}[-0.0158 \ 0.6678 \ 0.3809 \ -0.0646]$

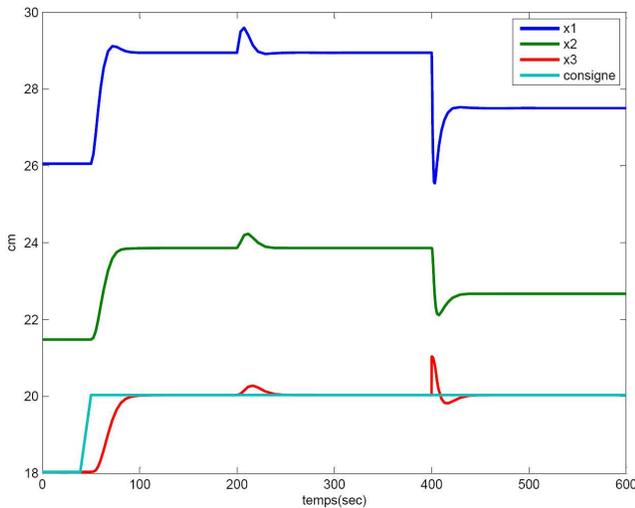


Fig. 8. Réponse du système bouclé avec la commande par retour d'état et l'action intégrale

V. EXPÉRIMENTATION

Dans cette partie, les élèves valident la commande et l'observateur développés dans la section précédente sur la maquette en temps réel. Le passage de la simulation à l'expérimentation est direct parce que le code est automatiquement généré à l'aide de "Real-Time Workshop" de Matlab. La durée de cette partie est de 2 heures.

Dans notre cas, l'observateur démarre à l'instant $t = 5 \text{ sec}$ et la commande par retour d'état à l'instant $t = 25 \text{ sec}$. De même qu'en simulation, un échelon de 2 cm sur x_3 est appliqué à l'instant $t_1 = 50 \text{ sec}$ puis une perturbation constante sur le débit d'entrée de 10 L/h à l'instant $t_2 = 200$

sec et ensuite une perturbation sur x_3 à l'instant $t_3 = 400 \text{ sec}$. Avant chaque essai, le système est ramené autour du point d'équilibre.

Nous observons un comportement sensiblement identique à celui déterminé en simulation. En asservissement, le temps de réponse à 95% est de 9 sec (figure 9). Les essais en régulation démontrent que le système peut rejeter les perturbations qui lui sont appliquées (figure 10).

VI. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté une maquette pédagogique qui permet de faire travailler les élèves de l'école sur la modélisation par représentation d'état, la conception d'un observateur et d'une commande par retour d'état. Après un temps de préparation à domicile pour l'élaboration du modèle non-linéaire du système, elle permet de confronter facilement expérience et simulations sur une durée de 8 heures. Les compétences nécessaires aux élèves pour réaliser ce TP sont : la modélisation, linéarisation, simulation avec Matlab, calcul d'observateur, commande par retour d'état.

Les étudiants ont trouvé que l'exemple d'application apportait un bon complément aux cours théoriques. En effet, ils ont été particulièrement intéressés par la construction de l'observateur et ont directement perçu son enjeu (réduction du nombre de capteurs ...). Ils ont de plus manifesté un grand intérêt pour la partie informatique - électronique. C'était pour eux une des premières confrontations à une application industrielle. Cette maquette leur a permis de faire le lien entre les schémas blocs théorique et d'application, et notamment de bien y distinguer la région contrôle de la région procédé.

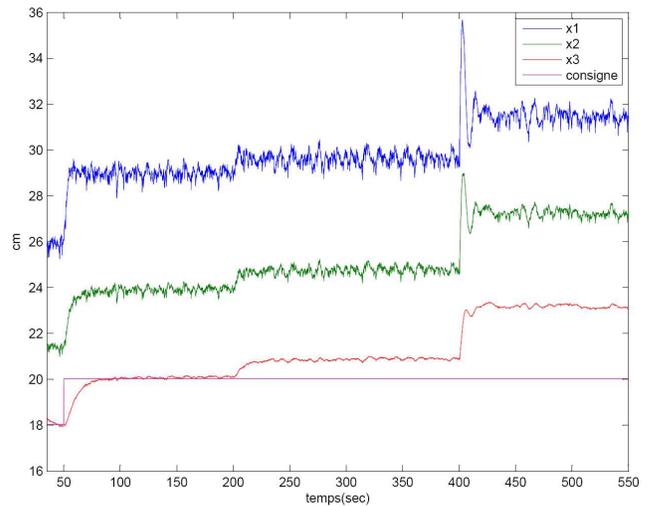


Fig. 9. Réponse du procédé réel bouclé avec la commande par retour d'état sans l'action intégrale

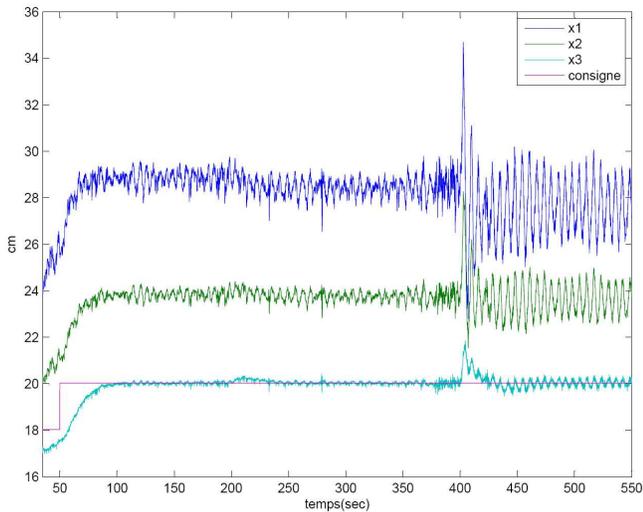


Fig. 10. Réponse du procédé réel bouclé avec la commande par retour d'état avec l'action intégrale

Pour finir, on a estimé la consommation d'eau annuelle de cette maquette. Le débit moyen étant de 100 L/h et les élèves faisant en moyenne 5 essais de 500 sec par TP, nous consommons environ 70 litres d'eau à chaque TP de 8h soit 1890 litres par an pour toutes les filières (27 groupes de binômes). L'idéal étant bien-sûr de mettre en place un système de récupération d'eau, solution que nous envisageons dans les années qui viennent. Ce procédé montre donc aux élèves qu'en automatique, l'utilisation des outils de simulation avant de passer sur le vrai procédé a un double intérêt : un gain de temps pour les procédés lents (temps de réponse long) et un gain d'énergie au sens large.

VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les membres de l'équipe technique du laboratoire Gipsa-lab qui conçoivent et maintiennent les procédés de la plate-forme AIDA.

REFERENCES

- [1] <http://ense3.grenoble-inp.fr>
- [2] <http://www.advantech.com/>
- [3] <http://www.mathworks.com/products/rtwt/>
- [4] *Feedback control of dynamic systems*, Franklin, G.F. and Powell, J.D. and Emami-Naeini, A. and Powell, J.D., sixth edition, 2010