

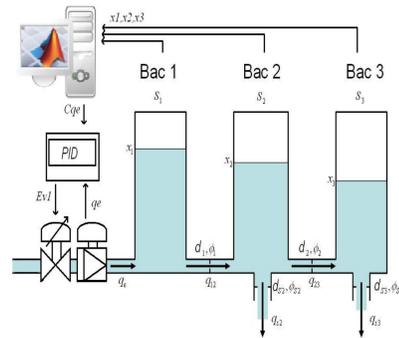
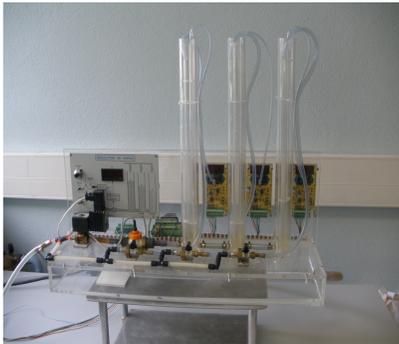
I. Contexte générale

Une maquette pédagogique qui permet de faire travailler les élèves de l'école ENSE3 sur la modélisation par représentation d'état, la conception d'un observateur et d'une commande par retour d'état d'un procédé hydraulique. La durée de TP est de 8 heures. Les compétences nécessaires sont : modélisation, linéarisation, simulation avec Matlab, calcul d'observateur et commande par retour d'état.

II. Présentation du procédé

La maquette est composée de :

- Trois bacs communicants :



Procédé : Régulateur de débit avec les trois bacs communicants.

Le premier bac est alimenté par un débit noté q_e , délivré par une vanne régulée en débit, dont on pilote la consigne. Les trois bacs, de section effective S_i , communiquent entre eux à travers des orifices de diamètre d_i , de section ϕ_i et de coefficient de débit α_d .

- Une partie électrique :

Les hauteurs (x_1, x_2, x_3) sont obtenues par mesure de la pression au fond de chaque bac. Le débit est réglé par un PID réalisé par une carte électronique qui pilote une vanne proportionnelle électrique et d'un débit-mètre à impulsions.

- L'informatique associée :

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

III. Modèle non linéaire

Le bilan des débits entrant et sortants pour chacun des bacs. Le modèle non linéaire est d'ordre 3.

$$\begin{cases} S_1 \frac{dx_1(t)}{dt} = q_e(t) - q_{12}(t) \\ S_2 \frac{dx_2(t)}{dt} = q_{12}(t) - q_{23}(t) - q_{2s}(t) \\ S_3 \frac{dx_3(t)}{dt} = q_{23}(t) - q_{3s}(t) \end{cases}$$

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

$$q_{ij} = a_{ij} \sqrt{\Delta x}$$

avec a_{ij} dépendant de la section ϕ et du coefficient de débit moyen α_d de la réalisation : $a_{ij} = \alpha_d \phi \sqrt{2g}$

On considère la hauteur d'eau du troisième bac comme étant la sortie du système. Le système est au point d'équilibre pour

$$q_e = q_{ee} = 100 \text{ L/h} = 2,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}, \quad \frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \frac{dx_3}{dt} = 0$$

Ce qui donne le point d'équilibre suivant :

$$\begin{cases} x_{10} = \left(\frac{q_{ee}}{a_{12}}\right)^2 + x_{20} \\ x_{20} = q_{ee} / (a_{2s}^2 + a_{23}^2 \beta + 2a_{2s}a_{23} \sqrt{\beta}), \quad \beta = \frac{a_{23}^2}{a_{2s}^2 + a_{23}^2} \\ x_{30} = \beta x_{20} \end{cases}$$

AN : $50\text{cm} > x_{10} = 0.2606\text{m} > x_{20} = 0.2148\text{m} > x_{30} = 0.1803\text{m}$.

IV. Modèle linéaire

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

$$A = \begin{bmatrix} -0,2415 & 0,2415 & 0 \\ 0,2415 & -0,4244 & 0,1566 \\ 0 & 0,1566 & -0,1865 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 795,7747 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0], \quad D = [0]$$

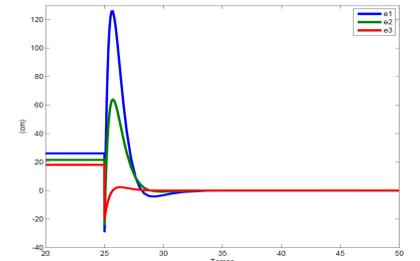
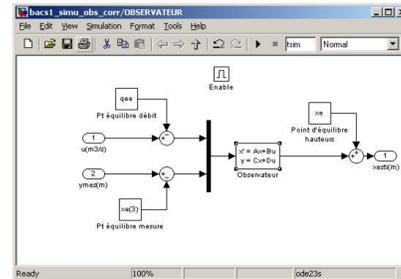
Les pôles du système en boucle ouverte sont stables avec les valeurs numériques suivantes :

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

V. Simulation

- Construction d'un observateur du système :

Le système est observable. 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. Le gain de l'observateur K est choisi tel que l'observateur soit plus rapide que le système en boucle ouverte.

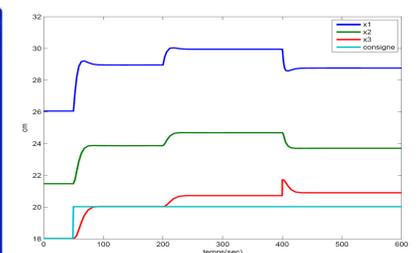
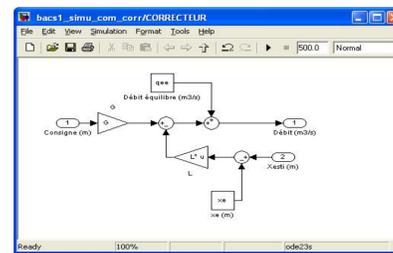


La structure de l'observateur avec $A_{obs} = A - BK$ et $B_{obs} = [B \ K]$. Les conditions initiales d'observateur sont 110% du point d'équilibre. Les erreurs d'estimation sont sur les niveaux d'eau

- La commande par retour d'état :

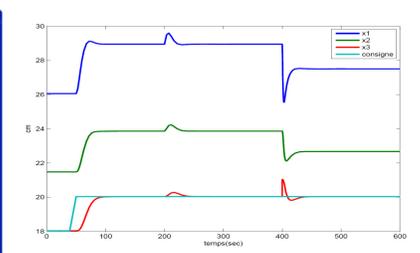
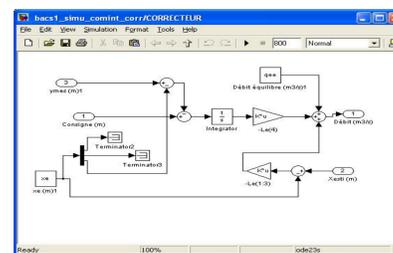
Le système est commandable. Il est donc possible d'obtenir n'importe quel régime de fonctionnement de notre état, à partir de la commande en débit d'alimentation du bac 1. Les pôles en boucle fermée sont fixés de manière à accélérer raisonnablement le système sans dépasser les limites sur le débit d'entrée.

♣ Sans l'action intégrale



La structure de la commande par retour d'état sans l'action intégrale avec $L = 10^{-3}[-0.2796 \ 0.6470 \ -0.1360]$ et $G = 3.0762 * 10^{-4}$. Réponse du système bouclé avec la commande par retour d'état sans l'action intégrale

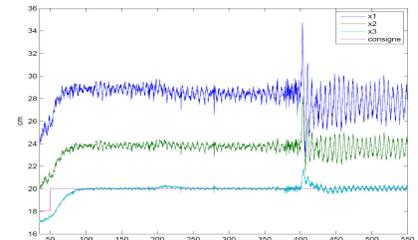
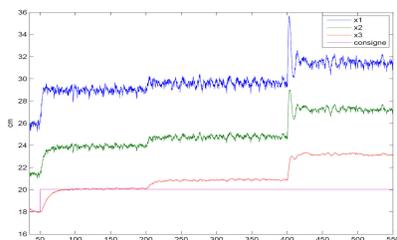
♣ Avec l'action intégrale



La structure de la commande par retour d'état avec l'action intégrale et $L_e = 10^{-3}[-0.0158 \ 0.6678 \ 0.3809 \ -0.0646]$. Réponse du système bouclé avec la commande par retour d'état et l'action intégrale

VI. Expérimentation

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.



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

VII. Conclusion

- ♣ Un exemple d'application apportait un bon complément aux cours théoriques.
- ♣ L'enjeu de l'observateur (réduction du nombre de capteurs).
- ♣ L'intérêt d'utiliser des outils de simulation : un gain de temps pour les procédés lents (temps de réponse long) et un gain d'énergie au sens large.
- ♣ Le lien entre les schémas blocs théorique et d'application.
- ♣ Consommation d'eau de cette maquette : 1890 litres par an (27 groupes de binômes).