

École d'ingénieurs pour l'énergie, l'eau et l'environnement



TRAVAUX PRATIQUES AUTOMATIQUE

Filière Automatique, Systèmes et Information (ASI)

<p>Cet exemplaire doit rester en salle AIDA</p>

PLATE-FORME TECHNOLOGIQUE AIDA

Fonctionnement général

Organisation du cycle

Le cycle comprend 3 séances de 4 heures en salle AIDA (GreEn-ER, 3D-001). Les étudiants se référeront à leur emploi du temps pour les dates exactes des séances.

Les étudiants sont répartis en 6 groupes (binômes ou à titre exceptionnel trinômes). Le passage des groupes aux différentes manipulations est décrit par le tableau ci-dessous.

LISTE DES MANIPULATIONS

- TP 1 Régulation de température sur un système aérotherme (1 séance)
- TP 2 Estimation et Régulation de niveaux d'eau dans un système multi-bacs (2 séances)

TABLEAU DE ROTATION

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6
séance 1	TP 1	TP 1	TP 2	TP 2	TP 2	TP 2
séance 2	TP 2	TP 2	TP 2	TP 2	TP 1	TP 1
séance 3	TP 2	TP 2	TP 1	TP 1	TP 2	TP 2

Les sujets de TP sont organisés en quatre parties. La première donne l'objectif de la manipulation, la deuxième correspond à la présentation du procédé, la troisième décrit la préparation à effectuer avant la séance en salle AIDA, et la dernière donne le travail à effectuer en séance. La préparation est impérative et sera vérifiée en début de séance. Le sujet de TP doit être lu avant la séance. Il convient également d'amener l'ensemble des documents nécessaires à l'expérimentation (cours, polycopiés, documents, abaques, de 1ère et 2ème année). Les comptes-rendus seront remis à la fin de la séance de chaque TP.

Notation

Chaque manipulation donne lieu à un compte-rendu par groupe à rendre en fin de séance, et qui fera l'objet d'une note qui prend en compte la préparation (contrôlée en début de séance), la participation des étudiants au déroulement du TP, les résultats obtenus et leurs interprétations. La moyenne des notes obtenues (une par TP) constituera la note finale de TP associée à l'unité d'enseignement "**AUTOMATIQUE 1**".

En cas d'absence prévisible **et préalablement justifiée par la Direction des études** lors d'une séance, les étudiants doivent impérativement prévenir l'enseignant qui les encadre. **Les absences injustifiées donnent lieu à un zéro pour la séance concernée, sans aucune possibilité de rattrapage.** De plus, tout retard non justifié à une séance entraînera la pondération de la note obtenue par l'étudiant à cette séance par un coefficient égal au prorata de la présence de l'étudiant durant la séance.

Table des matières

Fonctionnement général	1
1 Aérotherme	5
1.1 Objectifs	5
1.2 Présentation du procédé	5
1.3 Préparation	6
1.3.1 Modélisation et identification	6
1.3.2 Réglages d'un correcteur PID discret	8
1.4 Expérimentation	8
2 Système multi-bacs	13
2.1 Introduction	13
2.2 Description du procédé	13
2.3 Préparation : Modélisation du système	15
2.4 TP Estimation de niveau (Synthèse d'observateur)	16
2.4.1 Simulation	17
2.4.2 Expérimentation	17
2.5 TP Régulation de niveau (Synthèse de lois de commande par retour d'état) .	17
2.5.1 Simulation	18
2.5.2 Expérimentation	18

TP 1

Régulation de température - Aérotherme

1.1 Objectifs

L'objectif du TP est d'assurer la régulation de la température d'un procédé thermique. On impose :

- le temps de réponse du système bouclé.
- une erreur nulle en réponse à un échelon de consigne et de perturbation. Le régulateur utilisé est un PID discret pour lequel on calcule différents réglages.

1.2 Présentation du procédé

Il est constitué d'une cheminée métallique dans laquelle est disposée une résistance chauffante. Un ventilateur assure une circulation d'air dans la cheminée et un thermocouple permet de mesurer la température que l'on cherche à réguler.

La température peut varier de 0 à 200°C. la tension fournie par le conditionnement varie de 0 à 10V pour cette plage de température. Un amplificateur contrôle la puissance dans la résistance chauffante. La puissance varie de 0 à la puissance maximale pour une entrée variant de 0 à 10V. La régulation de vitesse sur le ventilateur permet de faire varier sa vitesse de V_{min} à V_{max} pour une entrée variant de 0 à 10V.

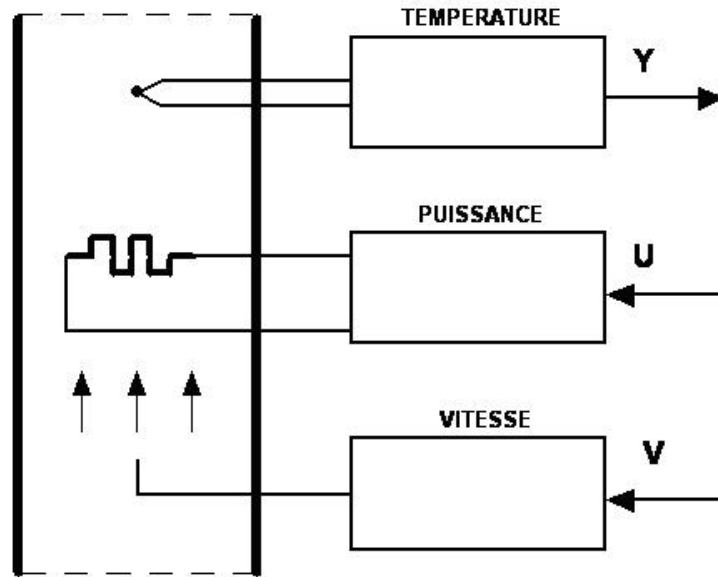


FIGURE 1.1 – Schéma "TI" -Tuyauterie Instrumentation

Les deux entrées de commande peuvent être internes (position INT des inverseurs), elles sont alors réglées par les deux potentiomètres. Dans cette position deux inverseurs permettent d'effectuer des échelons de ± 1 V sur ces entrées. En position externe (EXT), les entrées de commande sont fournies par l'extérieur. Dans le cas de ce TP, ces entrées sont fournies par un PC équipé d'une carte d'E/S analogiques. Un bornier situé en face arrière de la maquette permet la connexion à cette carte.

Les expérimentations se font en utilisant Matlab/Simulink.

1.3 Préparation

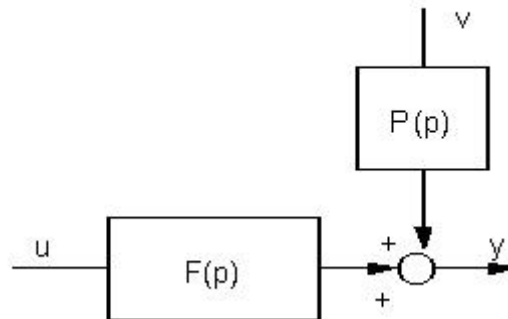
Il est demandé de faire dans cette partie le maximum de calculs en littéral.

1.3.1 Modélisation et identification

On considère le système à étudier composé de :

- une entrée u : entrée de commande de puissance
- une sortie y : mesure de la température
- une perturbation v : entrée de la commande de vitesse du ventilateur

Le schéma bloc du système est le suivant :



La figure 1.2 représente la caractéristique statique du système pour une vitesse du ventilateur de 6V.

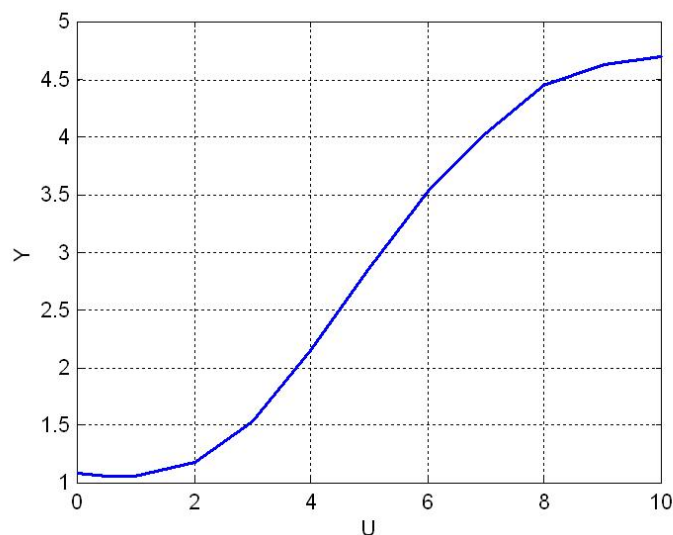


FIGURE 1.2 – La caractéristique statique du système pour une vitesse du ventilateur de 6V

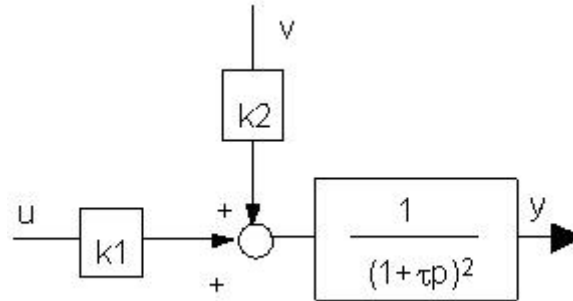
La figure 1.3 (fin du sujet) représente l'enregistrement de la réponse indicielle de la sortie y en réponse à l'entrée u .

La figure 1.4 (fin du sujet) représente l'enregistrement de la réponse indicielle de la sortie y en réponse à l'entrée v . Sur ces figures toutes les grandeurs physiques sont exprimées en volts.

P1. Le point de fonctionnement choisi est : $u_0 = 5V$ et $v_0 = 6V$. Justifier ce choix.

P2. Identifier les fonctions de transfert $F(p)$ et $P(p)$ à partir de ces deux enregistrements, en supposant que ces fonctions de transfert sont du deuxième ordre avec un pôle double.

P3. Justifier la mise du schéma bloc sous la forme suivante :



P4. On choisit une période d'échantillonnage, T_e , de 2 s. Justifier ce choix par rapport à la dynamique du système bouclé (sachant qu'on impose en boucle fermée des pôles dominants correspondant à une double constante de temps τ_{des} de 3s).

P5. Calculer le transfert $F(z)$ correspondant.

1.3.2 Réglages d'un correcteur PID discret

Pour régler le système en boucle fermée, on choisit le PID discret suivant :

$$K(z) = \frac{r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 + s'_1 z^{-1})}$$

P6. On testera différents réglages de ce correcteur. Un premier ($K_1(z)$) compense les pôles du système, un second ($K_2(z)$) ne les compense pas. On rappelle que les deux PID doivent positionner les pôles dominants du système bouclé aux mêmes valeurs. Les pôles dominants imposés correspondent à une double constante de temps τ_{des} de 3s.

P7. Écrire littéralement les fonctions de transfert en boucle fermée en asservissement et en régulation dans ces deux cas.

P8. Calculer les réglages de ces deux correcteurs.

1.4 Expérimentation

1. Afin d'obtenir un modèle plus précis, appliquer au système seul (sans bouclage et sans correcteur) un créneau de commande de 1V autour du point de fonctionnement. Affiner les coefficients k_1 et τ déterminés en préparation. Pour la suite du TP, vous utiliserez ces nouvelles valeurs.
2. Tester en simulation ces deux régulateurs en réponse à des créneaux de consigne de 1V puis des créneaux de perturbation de -1V.

3. Expliquer les réponses en calculant les pôles et zéros des fonctions de transfert en asservissement. Donner les avantages et inconvénients de ces deux réglages.
4. Tester sur le procédé réel ces deux régulateurs en réponse aux mêmes entrées qu'en simulation après avoir positionné le système autour du point de fonctionnement correspondant à $u_0 = 5V$ et $v_0 = 6V$.
5. Proposer une modification de la **structure** du régulateur ($K_3(z)$) qui permette d'allier les avantages des deux réglages. Tester ce nouveau réglage en simulation et sur le procédé réel.

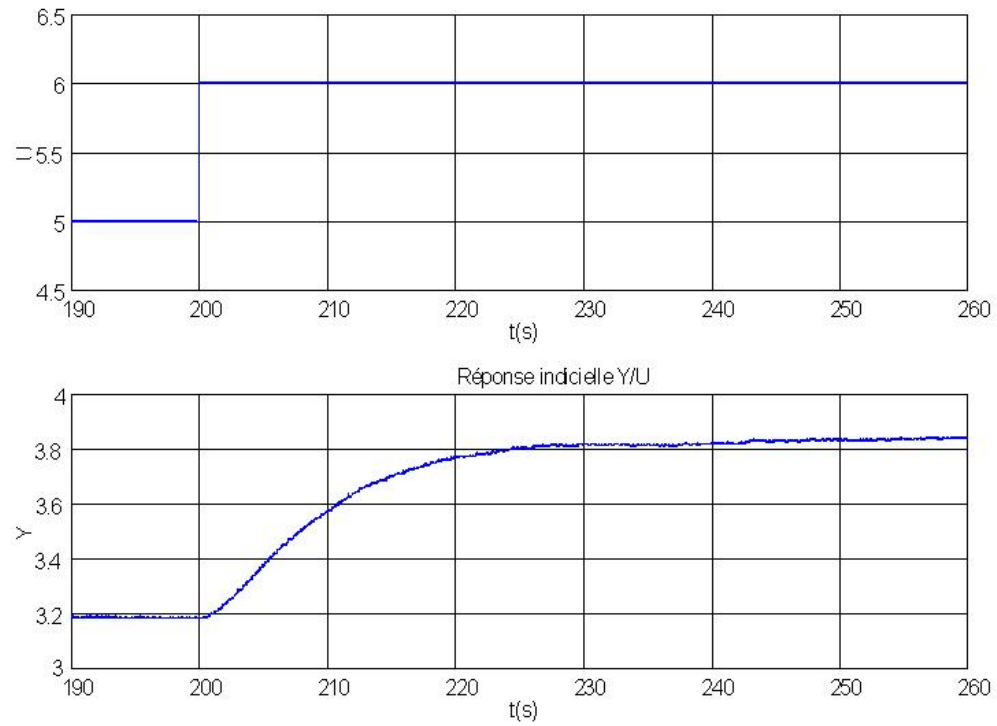
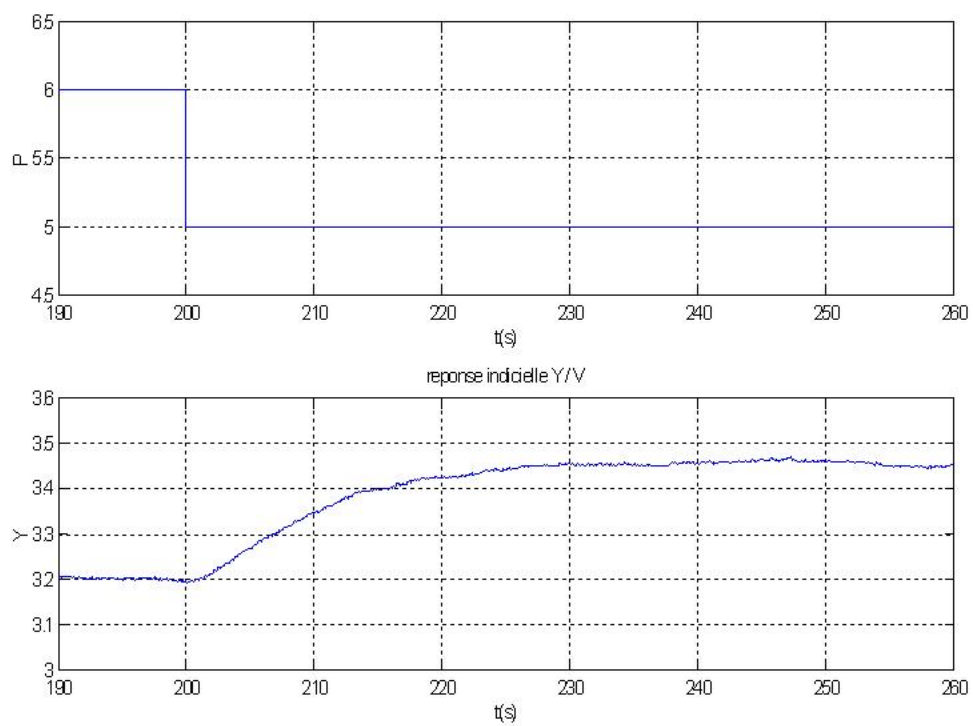


FIGURE 1.3 – La réponse indicielle de la sortie y en réponse à l'entrée u

FIGURE 1.4 – La réponse indicelle de la sortie y en réponse à l'entrée v

TP 2

Estimation et Régulation de niveaux d'eau dans un système multi-bacs

2.1 Introduction

Le but principal de ce TP est de synthétiser des lois de commande par retour d'état (mesuré et estimé) pour un système hydraulique, voir Figure 2.1. Ces lois de commande seront calculées à partir d'un modèle linéaire du procédé obtenu par une linéarisation autour d'un point de fonctionnement. De plus, dans le cas de la commande par retour d'état estimé un observateur d'état sera mis en place.

L'objectif de ces lois de commande consiste à assurer la stabilité du système, régler la hauteur d'eau dans le troisième bac à une valeur souhaitée et garantir un régime transitoire sans oscillations. Ce problème de contrôle apparaît généralement dans les réseaux de réservoirs de stockage industriels. En effet, des gains substantiels sont obtenus grâce à un contrôle précis du niveau de liquide dans ces réservoirs. Également, le contrôle du niveau est très important durant la phase de remplissage des moules industriels. En effet, les oscillations des niveaux de liquides peuvent détériorer considérablement la qualité de la surface du produit final.

2.2 Description du procédé

Le système hydraulique étudié dans le cadre de ce TP est constitué de trois bacs de géométries différentes montés en cascade comme le montre la Figure 2.2.

Notons que le quatrième bac, placé à la base de la maquette, joue le rôle d'un réservoir d'eau pour le système hydraulique. Une pompe à vitesse variable est utilisée pour alimenter le premier bac de la maquette (bac du haut) à partir de ce réservoir. Ainsi, le liquide s'écoule dans les trois bacs en cascade, à travers des vannes, sous l'effet de la gravité. Chaque bac est équipé d'une vanne manuelle et d'une électrovanne et les niveaux du liquide dans chaque

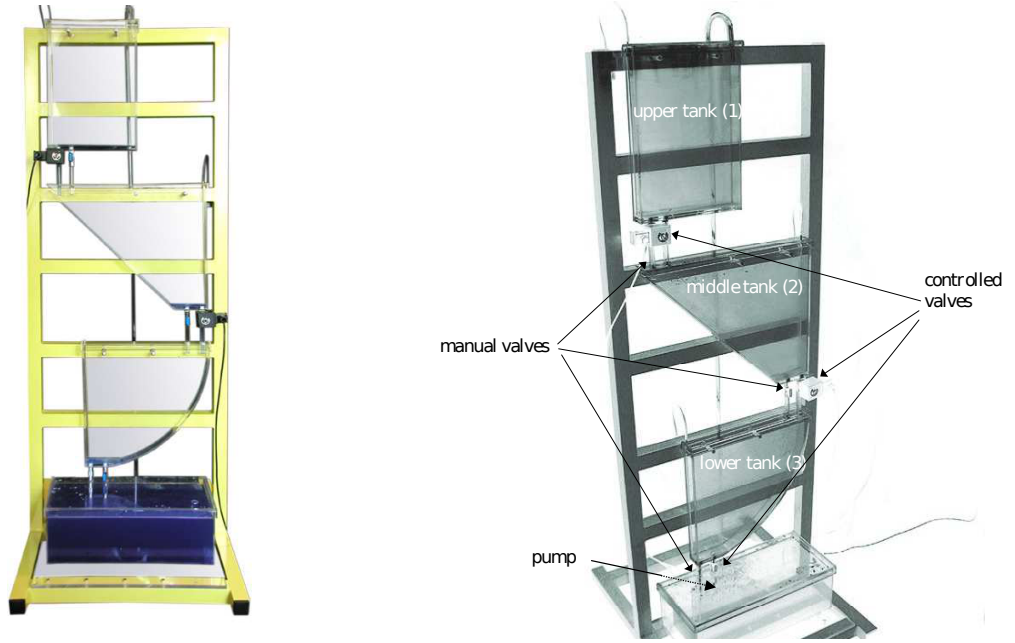


FIGURE 2.1 – Système multi-bacs. Photos de la maquette.

bac sont mesurés par des capteurs de pression. Les sections transversales de chaque bac sont calculées à partir des formes géométriques présentées dans la Figure 2.2.

Pour le premier bac la section transversale est constante et indépendante de la hauteur d'eau H_1 :

$$S_1 = aw \quad (2.1)$$

La section du bac de milieu est variable et dépend de la hauteur d'eau H_2 :

$$S_2(H_2) = cw + \frac{H_2}{L}bw \quad (2.2)$$

et enfin la section du troisième bac dépend de la hauteur d'eau H_3 :

$$S_3(H_3) = w\sqrt{R^2 - (R - H_3)^2} \quad (2.3)$$

Les valeurs numériques des constantes a , b , c , R , L et w sont données dans la Figure 2.2. D'autre part, le domaine admissible de la hauteur de liquide dans chaque bac est déterminée par les doubles inégalités suivantes :

$$0 \leq H_i \leq H_{max}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.4)$$

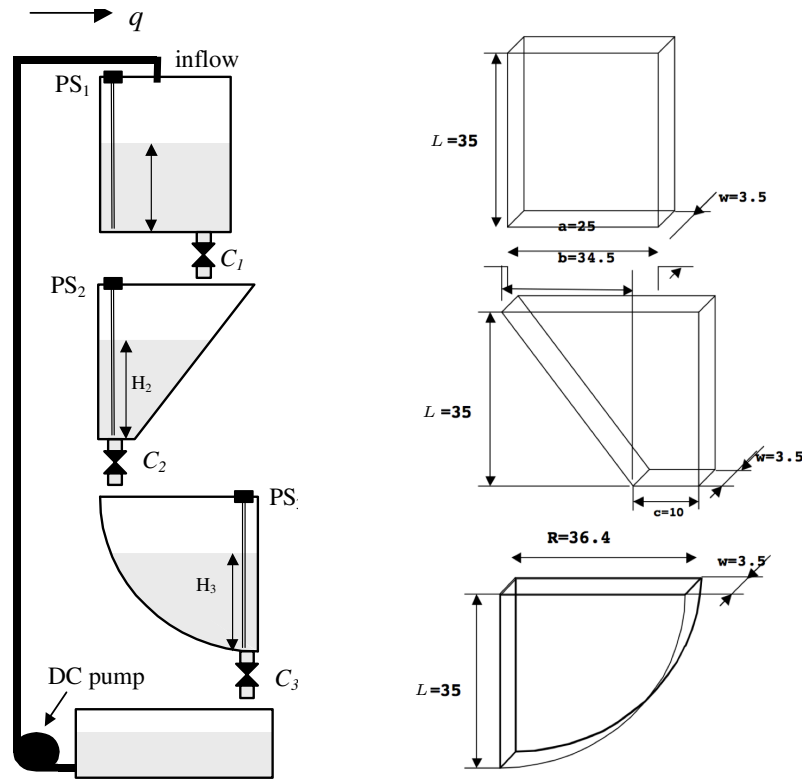


FIGURE 2.2 – Configuration verticale du système multi-bacs. Les paramètres géométriques de chaque bac sont données en centimètres.

où $H_{max} = 0.25 \text{ m}$, et le domaine admissible de la commande (débit d'entrée du premier bac) est donné par

$$0 \leq Q_e \leq Q_{max} \quad (2.5)$$

où $Q_{max} = 1.4e-4 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit 504 L/h).

2.3 Préparation : Modélisation du système

Supposons que le liquide dans chaque bac du procédé est parfaitement incompressible et que l'écoulement à travers les vannes du système n'est pas complètement laminaire en pratique. On peut appliquer la loi de Bernoulli, légèrement modifiée, pour calculer le débit sortant de chaque bac comme suit :

$$Q_i = C_i H_i^\alpha, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

où C_i , $i = 1, 2, 3$ représente la résistance de sortie de l'orifice du bac i et $\alpha \leq 0.5$ est son coefficient d'écoulement. Les valeurs numériques de ces paramètres, obtenues par une approche d'identification expérimentale, sont disponibles dans le fichier `init.m` (sur Chamilo INP).

Dans le cadre de cette étude, nous considérons que le vecteur d'état de ce procédé est constitué par les hauteurs de liquide dans chaque bac, le signal de commande est le débit d'entrée du premier bac (fourni par l'électropompe) et la grandeur de sortie est la hauteur de liquide dans le troisième bac.

- P1.** En se basant sur les lois de la physique qui gouvernent ce procédé, proposer une représentation d'état. Quelle est la nature de cette représentation d'état ?
- P2.** Tracer les courbes représentant tous les points d'équilibre possibles en boucle ouverte, H_i vs Q_e , pour des valeurs de Q_e respectant $0 \leq Q_e \leq Q_{max}$.
- P3.** Quelle sera la valeur de débit d'entrée à l'équilibre, dénotée Q_0 , pour une hauteur de liquide à l'équilibre de $H_{30} = 0.15$ m sur le troisième bac.
- P4.** En supposant que, autour du point de fonctionnement, la section S_i varie peu, on fait l'approximation suivante :

$$\frac{d(S_i H_i)}{dt} \approx S_{i(eq)} \frac{dH_i}{dt}.$$

Linéariser le modèle d'état obtenu à la première question autour du point de fonctionnement $H_0 = [H_{01} \ H_{02} \ H_{03}]^T$. Montrer qu'il s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= \frac{-C_1 \alpha H_{10}^{\alpha-1}}{S_{1(eq)}} h_1 + \frac{1}{S_{1(eq)}} q_e \\ \dot{h}_2 &= \frac{C_1 \alpha H_{10}^{\alpha-1}}{S_{2(eq)}} h_1 - \frac{C_2 \alpha H_{20}^{\alpha-1}}{S_{2(eq)}} h_2 \\ \dot{h}_3 &= \frac{C_2 \alpha H_{20}^{\alpha-1}}{S_{3(eq)}} h_2 - \frac{C_3 \alpha H_{30}^{\alpha-1}}{S_{3(eq)}} h_3 \end{aligned} \quad (2.7)$$

avec $H_i = h_i + H_{i0}$ et $Q_e = Q_0 + q_e$ où h_i et q_e représentent des variations autour du point de fonctionnement.

- P5.** Rappeler la validité de ce modèle linéaire, puis analyser sa stabilité asymptotique.
- P6.** Vérifier la commandabilité et l'observabilité du système linéarisé.

2.4 TP Estimation de niveau (Synthèse d'observateur)

L'objectif de cette partie du TP est de construire un observateur d'état pour le système hydraulique. L'idée est d'établir un "capteur logiciel" capable de reconstruire en temps réel le vecteur d'état du système à partir de la connaissance de ses signaux d'entrée et de sortie.

2.4.1 Simulation

1. Donner l'équation d'état de cet observateur. On notera L le gain de l'observateur.
2. Quelle-est la condition qui assure la convergence de l'erreur d'estimation ?
3. En utilisant la commande *place* de Matlab, calculer le gain de l'observateur L par placement de pôles. **Indication** : en général la dynamique de l'observateur doit être plus rapide que celle du système.
4. Utiliser le schéma Simulink `Bacs_Simu.slx`, contenant le système non-linéaire, pour évaluer les performances de votre observateur. Pensez à visualiser l'évolution de l'erreur d'estimation.
5. Réaliser plusieurs simulations pour des conditions initiales différentes $\hat{H}(0) \neq H(0)$. Discuter et analyser les résultats de simulations.
6. Proposer plusieurs réglages du gain d'observation, puis simuler votre observateur pour chaque gain (on pourra tester les performances en présence de bruit sur la sortie). Analyser vos résultats en termes de vitesse de convergence, de sensibilité au bruit de mesure et de qualité du régime transitoire. Choisir le gain L que vous utiliserez dans la suite de ce TP, en justifiant votre choix.

2.4.2 Expérimentation

1. Utiliser le schéma Simulink `Bacs_Exp.slx` (que vous analyserez au préalable), pour évaluer les performances de votre observateur en temps réel. Pensez à visualiser l'évolution de l'erreur d'estimation.
2. Réaliser plusieurs essais en perturbant le système ; un premier essai consistera à vérifier le bon fonctionnement de votre observateur lorsque le système se trouve au point de fonctionnement choisi, en l'absence de perturbation. Discuter et analyser les résultats expérimentaux.
3. Réaliser plusieurs essais en utilisant un modèle erroné du système (en modifiant par exemple la résistance de sortie d'un orifice pour synthétiser votre observateur). Discuter et analyser les résultats expérimentaux.

2.5 TP Régulation de niveau (Synthèse de lois de commande par retour d'état)

Dans cette partie du TP on suppose que les trois niveaux sont connus à chaque instant (mesurés ou estimés) pour concevoir une loi de commande par retour d'état du système hydraulique. L'objectif de cette loi de commande est de régler le niveau d'eau dans le troisième bac, de réduire le temps de réponse du système et d'avoir une réponse indicielle sans dépassement.

2.5.1 Simulation

1. Donner l'équation d'état du système en boucle fermée. On notera K le gain du retour d'état.
2. Quelle est la condition qui assure la stabilité du système contrôlé ?
3. En utilisant la commande *place* de Matlab, calculer le gain de la commande K par placement de pôles. **Indication** : votre choix de pôles doit permettre de respecter les contraintes opérationnelles. Penser à recalculer le gain L si nécessaire (en tenant compte de la dynamique du système en boucle fermée).
4. Utiliser le schéma Simulink `Bacs_Simu.slx`, contenant le système non-linéaire, pour évaluer les performances de votre loi de commande. Visualiser l'évolution de la consigne et de la sortie sur une même figure. Sur une autre figure, visualiser la commande en débit et vérifier l'absence de saturation.

2.5.2 Expérimentation

1. Utiliser le schéma Simulink `Bacs_Exp.slx`, pour évaluer les performances de votre commande en temps réel.
2. Vérifier si les contraintes sur la commande et l'état du système sont bien respectées. Proposer un autre réglage de la commande si nécessaire.
3. Réaliser plusieurs essais en perturbant le système (utiliser les électrovannes permettant de produire des débits perturbateurs). Discuter et analyser les résultats expérimentaux.
4. Que proposeriez-vous pour améliorer les performances de votre commande et pour pouvoir rejeter les perturbations agissant sur le système ?
5. Modifier vos schémas Simulink (`Bacs_Simu.slx` et `Bacs_Exp.slx`) en conséquence.
6. Commenter et analyser les résultats obtenus en simulation et sur le système réel en utilisant l'état estimé pour générer la commande. On s'intéressera en particulier à la régulation de niveau et à l'estimation des variables d'état.
7. Réaliser plusieurs essais (simulation et expérimentation) en utilisant un modèle erroné du système lors de la synthèse du correcteur. Discuter et analyser les résultats expérimentaux.