

**Université Sidi Mohammed Ben Abdellah**  
**Ecole Supérieure de Technologie de Fès**  
**Département Génie des Procédés 2<sup>ème</sup> année.**  
**Filières : Génie Thermique et Energétique (GTE)**

Examen de régulation industrielle (2012-2013) : Durée : 2 h

Les documents personnels sont autorisés (cours+TD)

Les téléphones et PC portables ne sont pas autorisés !

**D'.Ing.M.Rabi** : <http://www.est-usmba.ac.ma/Rabi>

### **I- Questions de cours**

1- Les racines de l'équation  $1 + FTBO(s)$  d'un procédé sont :  $-1, -\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2}j$ . Ce procédé en boucle fermée sera-t-il : Stable ? Instable ou Oscillant ?

2- Le sens de la régulation est direct si la commande et la grandeur réglée varient dans le même sens ou si la commande et la grandeur réglée varient en sens inverses ?

### **II- Problème : Boucles de régulation automatique d'une chaudière**

Une chaudière de production de vapeur comporte un faisceau de vaporisation aboutissant dans un ballon supérieur alimenté en eau venant d'un économiseur (Figure 1 et 1bis). La vapeur saturante issue du ballon passe dans un surchauffeur pour en ressortir à 249.9 °C. Les brûleurs situés en partie inférieure de la chambre de combustion sont alimentés en Méthane CH<sub>4</sub> et d'air de combustion. Le fonctionnement optimal de la chaudière impose une régulation du niveau et de la pression dans le ballon supérieur.

En principe le niveau d'eau dans le ballon supérieur de la chaudière est régulé par simple boucle c'est-à-dire par action directe sur le débit d'alimentation en eau  $q_e$ . Mais à cause des fluctuations que peut subir la pression  $P_e$  de refoulement de la pompe et donc la grandeur réglante  $q_e$ , on installe une deuxième boucle pour stabiliser le débit  $q_e$  et on obtient alors une régulation multiple ou en cascade de niveau avec LC2 est le régulateur maître et FC1 est le régulateur esclave (Figure 1 à droite).

Par une même technique, la pression dans le ballon est maintenue constante par une régulation en cascade avec PC1 est le régulateur maître et FC4 est le régulateur esclave. En plus et comme le débit d'air doit rester proportionnel au débit du combustible, ce ci est réalisé alors par une régulation du rapport de ces deux débits : le bloc FY4 reçoit la mesure du débit de gaz de combustion CH<sub>4</sub> en provenance du capteur transmetteur FT4 puis calcul le débit consigne débit d'air de combustion pour FC5 en multipliant la mesure par un coefficient de proportionnalité K (Figure 1 à gauche).

#### Point de fonctionnement en régime nominal :

- ✚ Le ballon a une capacité de 295 L et doit être remplie à 65% soit un niveau de 0.62 m.
- ✚ Le débit d'eau d'alimentation du ballon à l'entrée de l'économiseur est de 4000 kg/h et sa température est de 20 °C.
- ✚ Le débit du combustible CH<sub>4</sub> est de 260 kg/h.
- ✚ La température et la pression dans le ballon sont respectivement 235.1 °C et 30.68 bar.
- ✚ Le débit d'air nécessaire à la combustion est de 4954 kg/h.

#### Instrumentations :

##### Capteurs-transmetteurs :

LT2	passif	0 - 1.2 m	4-20 mA
FT1	passif	0-12000 kg/h	4-20 mA
PT1	passif	0 - 50 bar	4-20 mA
FT4	passif	0-400kg/h	4-20 mA
FT5	passif	0-8000 kg/h	4-20 mA

##### Vannes de régulations :

FV 1	Pneumatique	NF	Positionneur	0.2 à 1.0 bar	0 à 10500 kg/h	Linéaire
FV4	Pneumatique	NF	Positionneur	0.2 à 1.0 bar	0 à 350 kg/h	Linéaire
FV5	Pneumatique	NO	Positionneur	0.2 à 1.0 bar	0 à 7000 kg/h	Linéaire

##### Régulateurs :

FC1 est un régulateur PID série, en entrée mesure et sortie commande 4-20 mA. Il est capable d'alimenter une boucle de mesure. LC2, en entrée mesure et sortie commande 4-20 mA est aussi capable d'alimenter une boucle de mesure.

## II.1 - Câblages, signaux et sens d'actions

- 1- Préciser pour les 2 boucles de régulation LC2 et PC1 la grandeur réglée, la grandeur réglante, les grandeurs perturbantes et la consigne. Quelles sont les valeurs de consignes (en %) à programmer sur les deux régulateurs ?
- 2- Effectuer le schéma de câblage de la boucle de régulation FC1. On souhaite enregistrer la mesure et la commande dans la boucle par un enregistreur FR1 2 voies en entrée 4-20 mA.
- 3- **(Facultative)** Effectuer le schéma de câblage de la boucle de régulation en cascade de niveau (LC2 et FC1). On souhaite enregistrer la mesure et la commande dans la boucle FC1 par un enregistreur FR1 2 voies en entrée 4-20 mA et indiquer la mesure de niveau sur un indicateur LI2 en entrée 2-10V.
- 4- Quelle sont les consignes des deux régulateurs FC4 et FC5 ? En déduire la valeur du coefficient K à introduire dans le calculateur FY4 (K= débit massique Air/débit massique fuel).
- 5- Vue la nature de la vanne FV4 (NF), les régulateurs PC1 et FC4 ont été programmés en sens inverse. En effet, si par exemple la pression dans le ballon augmente, le régulateur maître diminue la consigne (débit combustible) du régulateur esclave FC4, lui-même diminue la commande de la vanne FV4 pour ramener la pression donc à sa consigne. Dans ce cas le débit d'air de combustion doit aussi diminuer, quel doit être le sens d'action du régulateur FC5 ?
- 6- La commande issue du régulateur FC1 est de 40 %, quelle est la valeur de l'intensité dans le circuit de commande ? Quelle est la valeur de pression de commande ? Quelle est l'ouverture de la vanne FV1 ? Quel est le débit qui traverse alors cette vanne ?
- 7- Quelles sont les commandes en régime nominal (valeurs centrales) des boucles FC1, FC4 et FC5 ? En déduire celles des régulateurs PC1 et LC2.

## II.2 - Régulations

Pour les raisons qui ont été expliquées précédemment, le niveau d'eau dans le ballon supérieur de la chaudière est fixé par une régulation en cascade : FC1 est le régulateur esclave et LC2 est le régulateur maître (Figure 2).

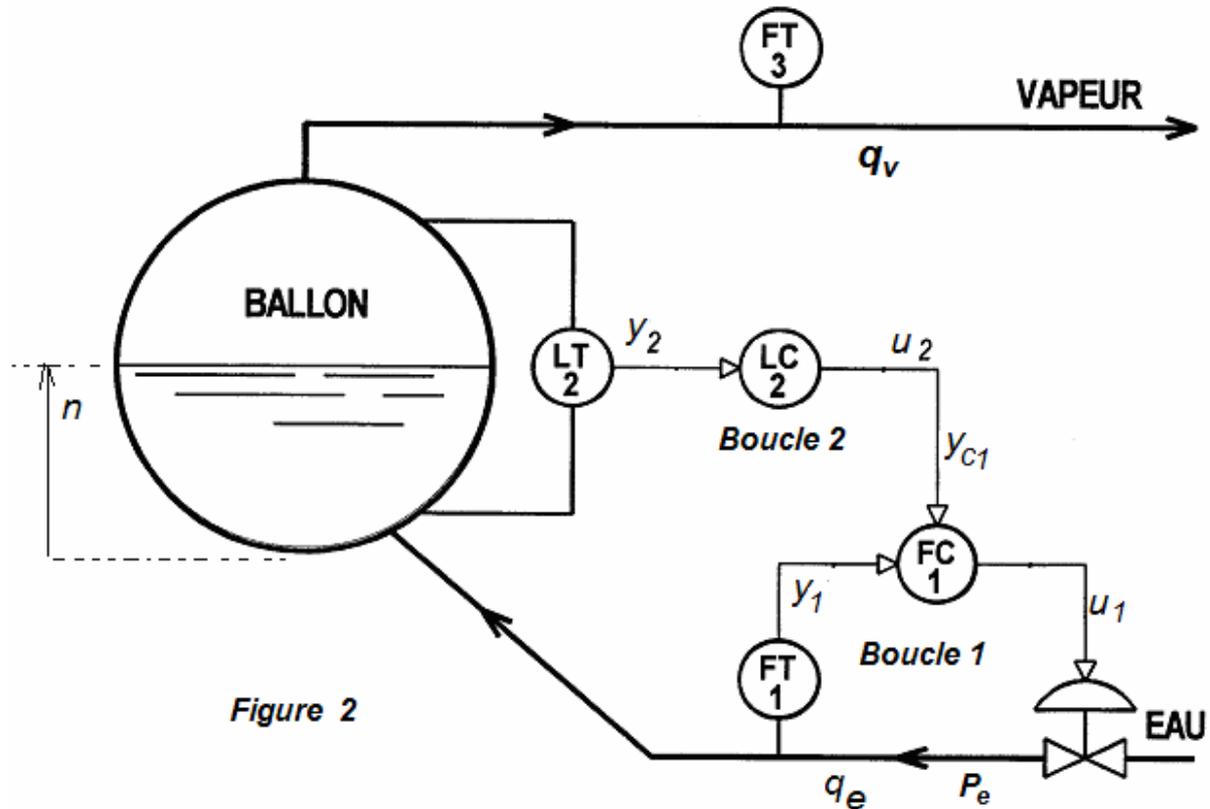


Figure 2

### 1- Régulation de débit d'eau alimentaire (boucle 1)

Le régulateur de débit FC1 doit assurer l'alimentation en eau du ballon de la chaudière. Tenant compte de la principale perturbation de cette boucle  $P_4 = P_e$  (pression de refoulement de la pompe), le schéma fonctionnel correspondant est le suivant (Figure 3) :

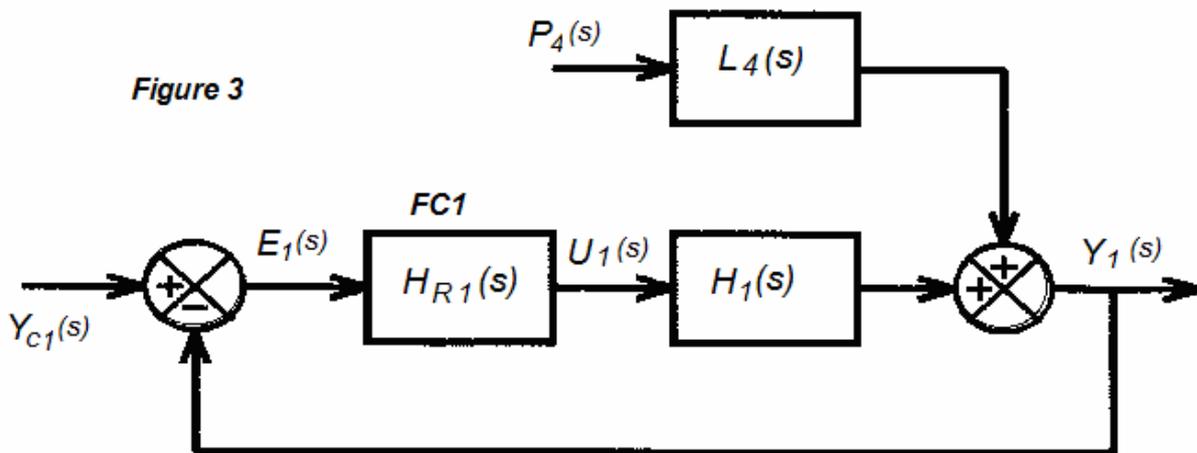


Figure 3

$H_1(s)$  est la fonction de transfert réglante (liant la commande  $u_1$  et le débit  $y_1$ ).

$L_4(s)$  est la principale fonction de transfert perturbatrice (Pression de refoulement  $P_e$  -Débit d'eau  $q_e$ ).

1.1- Le régulateur FC1 étant en commande manuelle, on réalise au temps  $t=0s$  et en l'absence de toute perturbation, un échelon sur la commande  $u_1$  de 38 % à 48 %. Les évolutions dans le temps de la mesure  $y_1$ (débit) et de la commande  $u_1$  sont données sur la figure 4 , l'allure de la réponse ainsi obtenue permet de choisir comme modèle de la fonction de transfert réglante  $H_1(s)$  un premier

ordre affecté d'un retard pur soit  $H_1(s) = \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{(1 + T_1 s)}$  , déterminer

graphiquement les paramètres  $K_1$ ,  $\tau_1$  et  $T_1$  . En déduire le mode idéal de régulation et les paramètres du régulateur FC1.

Quel est le temps de réponse à 5% en boucle ouverte, noté  $t_{5\%(BO)}$  .

1.2- L'analyse des performances de la régulation programmée (après introduction des paramètres ainsi calculés dans le régulateur FC1 on crée un échelon de 10% de la consigne) donne l'évolution de la figure 5. Quelles sont les valeurs des critères de performances ? De combien a-t-on accéléré le débit en boucle fermée ? (Accélération =  $t_{5\%(BO)} / t_{5\%(BF)}$ )

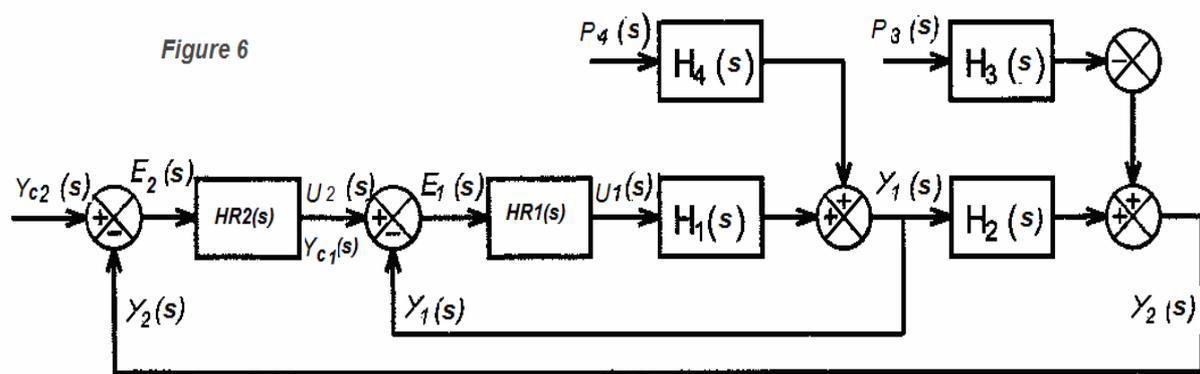
1.3- (Facultative) Calculer le gain critique  $K_{RC1}$  du régulateur FC1.

1.4- Sachant que la fonction de transfert perturbatrice est  $H_4(s) = \frac{K_4}{(1 + T_4 s)}$

et le régulateur FC1 est un PI série. Pour connaître la précision statique de la boucle, on applique un échelon d'amplitude (a) sur la perturbation  $P_e$  (pression de refoulement. Déterminer l'erreur de position ou valeur finale de  $e_1(t) = (y_{c1}(t) - y_1(t))$  lorsque  $t \rightarrow \infty$ . Le résultat était-il prévisible ? Interpréter ?

## 2- Régulation de niveau (boucle en cascade)

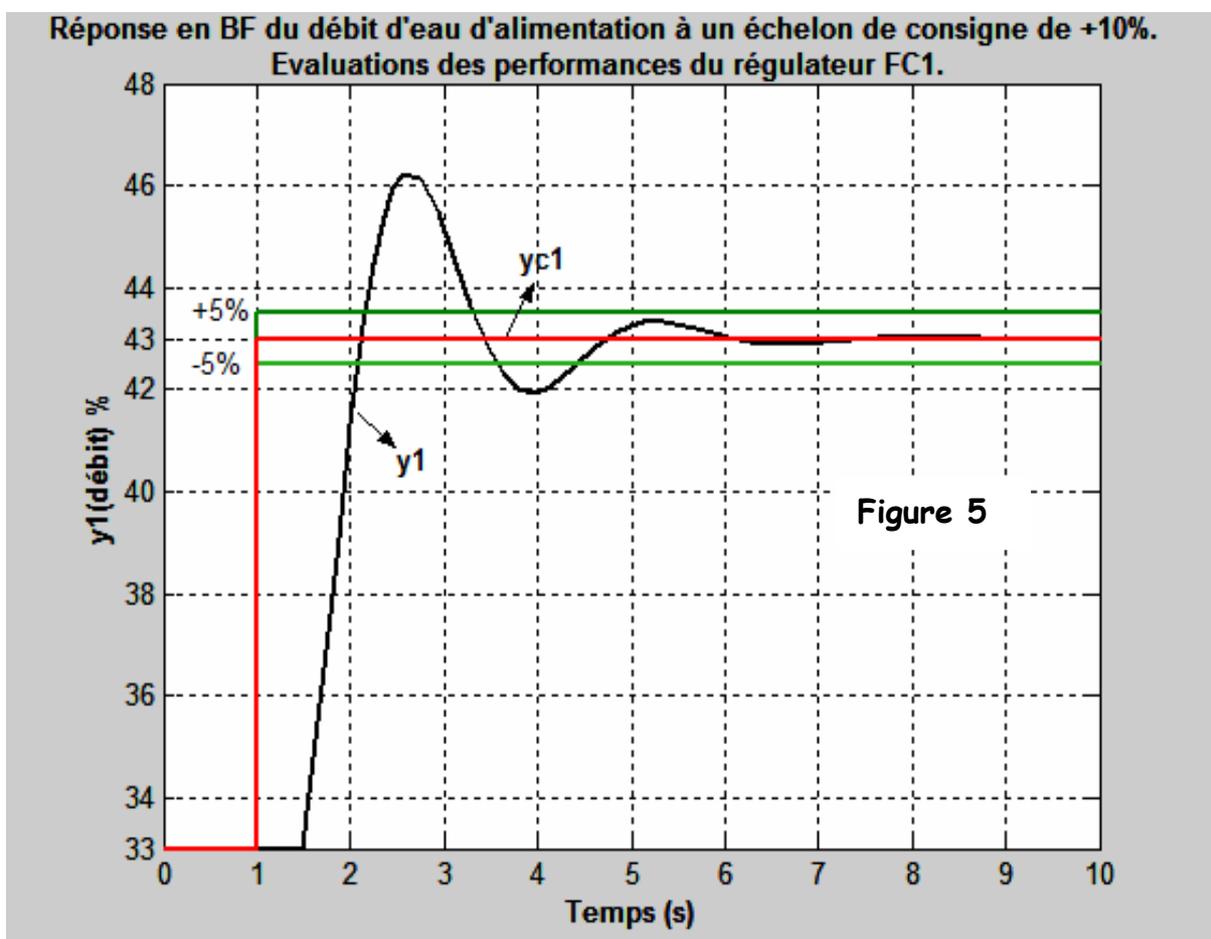
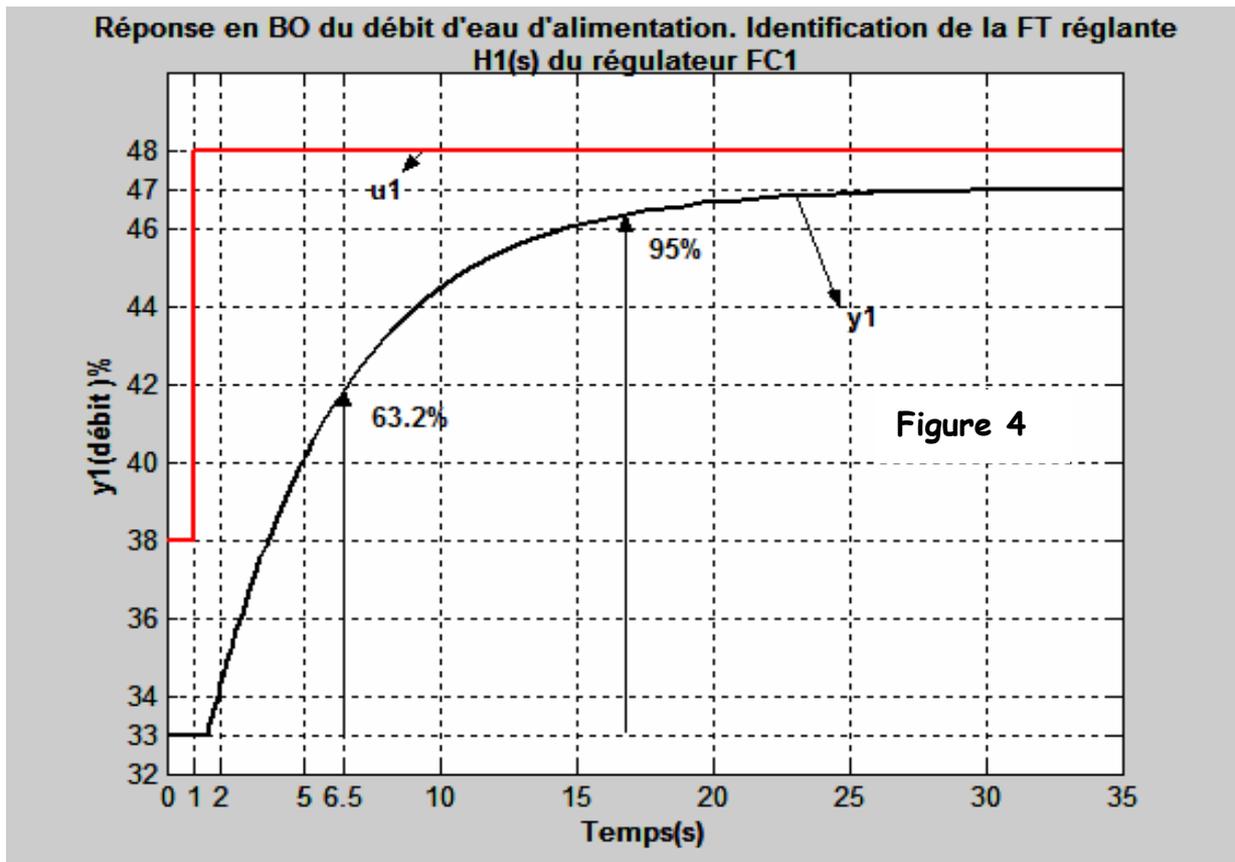
Le régulateur de niveau LC2 est chargé de maintenir constant le niveau du ballon en agissant sur la consigne externe du régulateur de débit d'alimentation FC1. L'une des principales perturbations de niveau est le débit de la vapeur produite  $q_v$  car il est géré par une autre boucle de régulation de température (figure 1bis). Le schéma fonctionnel de la régulation en cascade de niveau est représenté sur la figure 6.



2.1- En l'absence de perturbations on suppose que la fonction de transfert en chaîne fermée de la régulation de débit est  $FTBF_1(s) = \frac{1}{(1+T_1s)}$ . La fonction de transfert réglante  $H_2(s)$  débit-niveau est identifiée à un intégrateur de fonction de transfert  $H_2(s) \approx \frac{k_2}{s}$  avec  $k_2 = 0.08 \text{ s}^{-1}$ . Déterminer la fonction de transfert  $H_{R2}(s)$  du régulateur maître permettant d'obtenir en boucle fermée une fonction de transfert du premier ordre sans écart statique et de constante de temps  $T_2$ .

2.2- Réglage du régulateur LC2 : Le réglage du régulateur FC1 est celui trouvé en 1.1. On configure le régulateur maître LC2 en proportionnel seul et on commence à augmenter petit à petit son gain  $K_{R2}$  jusqu'à obtenir un pompage de niveau (boucle LC2 devient instable). Le gain trouvé est  $K_{RC2}=16$ . On règle alors un gain de  $K_{RC2}/2=8$ . Pour tester ce réglage, on réalise un échelon de consigne de +10 % de consigne de niveau et on obtient la réponse de la figure 7.

Quelles sont les valeurs des critères de performances ? La précision de 100% est-elle prévisible ?



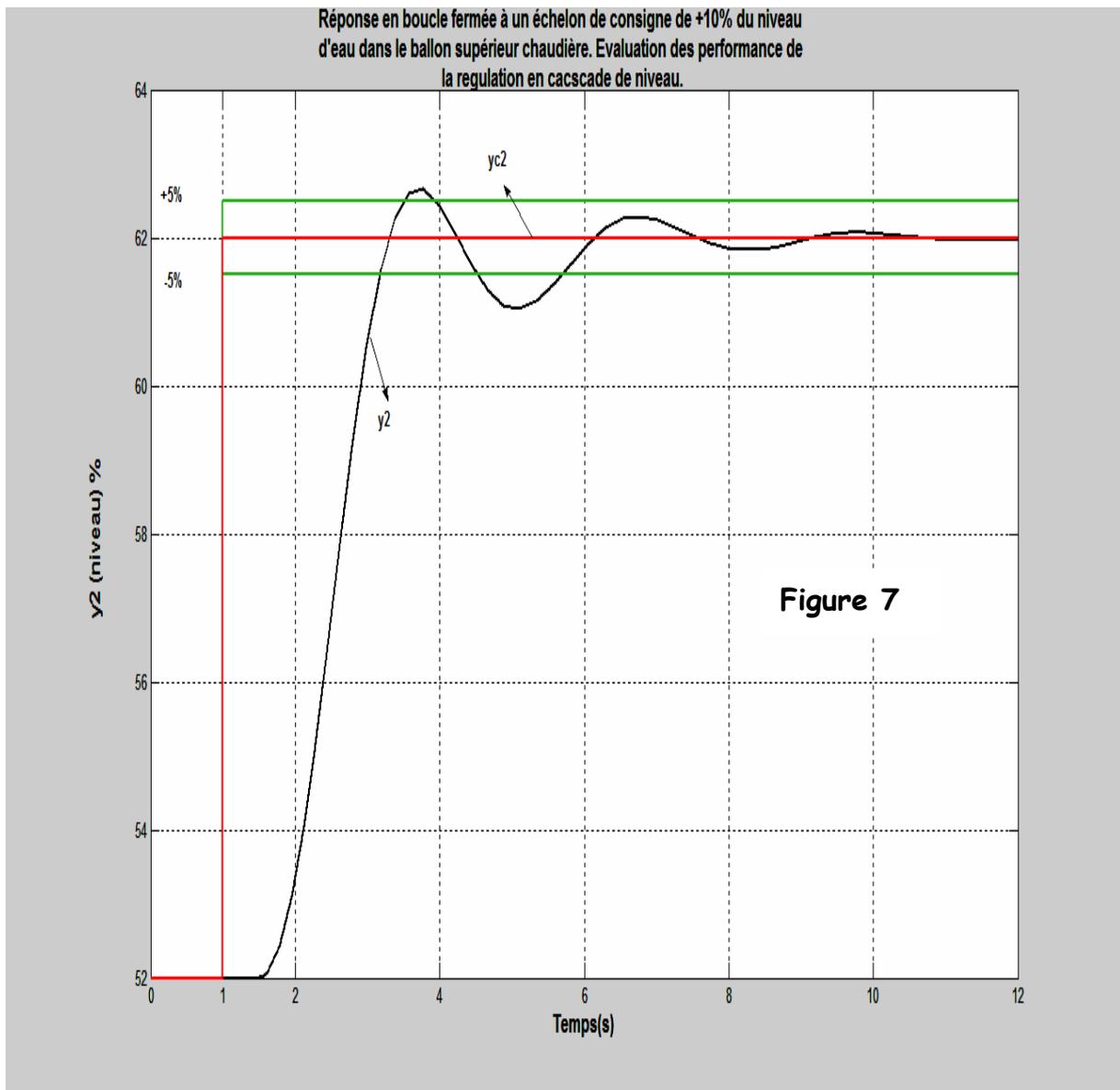
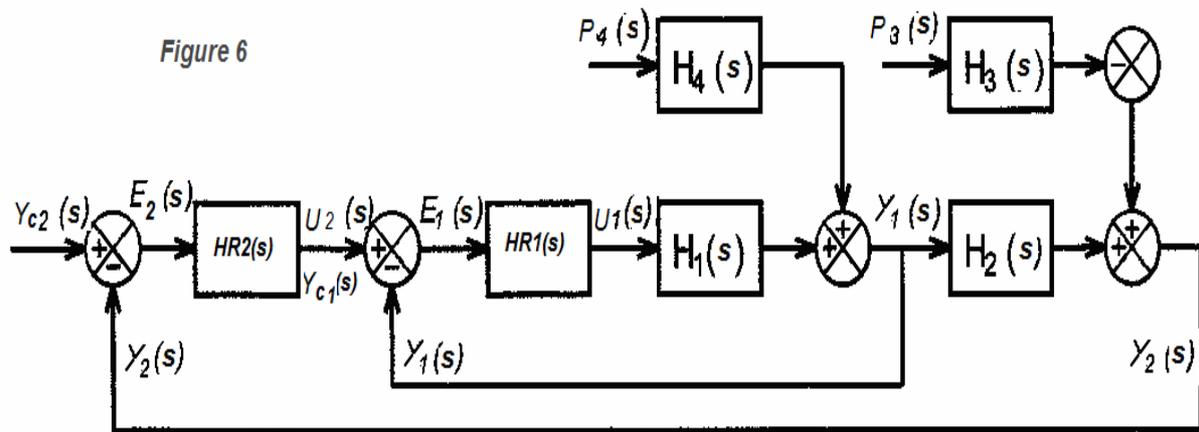
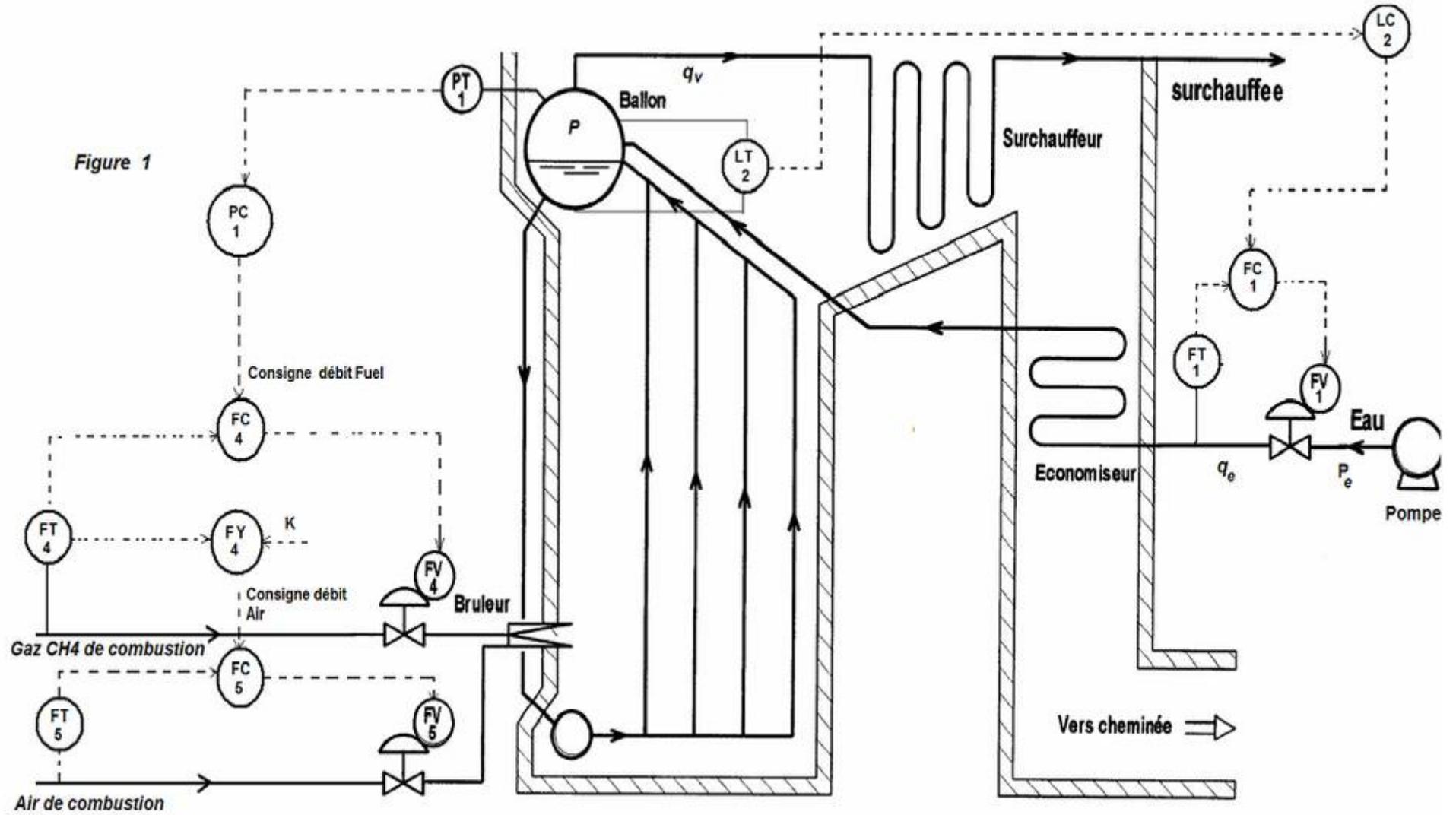


Figure 1



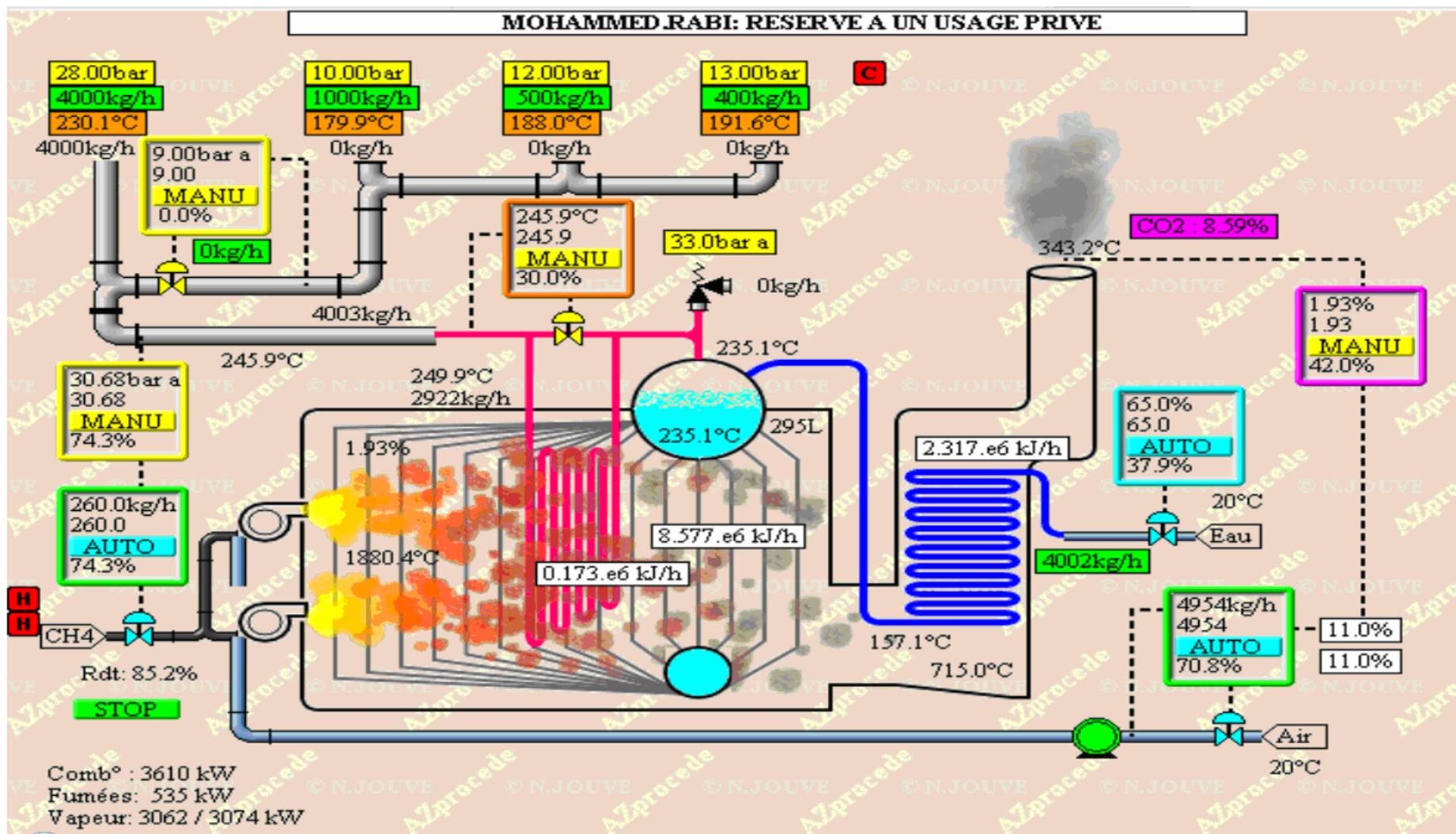


Figure 1bis : Copie d'écran de synoptique de commande de la chaudière

