

Brevet de Technicien Supérieur

**CONTRÔLE INDUSTRIEL
et
RÉGULATION AUTOMATIQUE**

U41 – Instrumentation et Régulation

Durée : 3 heures

Coefficient : 4

L'utilisation d'une calculatrice réglementaire est autorisée.
Calculatrice conformément à la circulaire n° 99-186 du 16/11/1999.

Aucun document autorisé.

Tout autre matériel est interdit.

*Avant de composer, assurez-vous que l'exemplaire qui vous a été remis est bien complet.
Ce sujet comporte 10 pages numérotées de 1/10 à 10/10.*

**L'annexe 1 -document réponse- est fournie en double exemplaire,
un exemplaire étant à remettre avec la copie ;
l'autre servant de brouillon éventuel.**

ÉTUDE ET COMPRÉHENSION D'UN PROCÉDÉ DE STÉRILISATION

Le schéma de l'ANNEXE 1 –*document réponse*- pages 6/10 et 7/10, représente, de façon simplifiée, un procédé de stérilisation d'un produit laitier, largement utilisé dans la production industrielle de diverses crèmes dessert. Cette étape de stérilisation fait l'objet d'une surveillance particulière car elle déterminera d'une part les qualités nutritives essentielles d'un produit destiné à la consommation grand public et assurera d'autre part les conditions nécessaires à la sécurité alimentaire en prévenant tout risque de prolifération microbienne.

À l'entrée de l'installation, ce produit est porté à une température d'environ 80 °C grâce à l'échangeur 1 qui est parcouru par de l'eau chaude, cette eau chaude étant elle-même réchauffée dans l'échangeur 2 au moyen de vapeur d'eau. On introduit ensuite le produit dans un bac de lancement où a été installée une régulation de niveau afin de maintenir constantes les conditions de fonctionnement de la pompe de reprise et sa sécurité.

Dans le circuit situé entre le bac de lancement et le vase d'expansion, il existe une tête d'injection de vapeur destinée à porter le produit laitier à une température très élevée, pendant une durée définie avec précision par le protocole de fabrication. C'est pourquoi une boucle de régulation de débit ainsi qu'une boucle de régulation de température ont été installées : elles permettent de fixer à la fois la température et le temps de séjour du produit laitier soumis à ce traitement. Ces deux paramètres sont déterminants pour veiller à la qualité de la stérilisation sans dénaturer la qualité du produit.

Le dispositif se termine par un vase d'expansion, dans lequel règne un vide partiel, qui sera donc le siège d'une évaporation à basse température. On évacue ainsi les buées, permettant d'éliminer la quantité d'eau qui a été introduite avec l'injection de vapeur. On peut ainsi redonner au produit laitier toutes ses qualités gustatives et nutritives. Grâce à la pompe 2 munie d'un variateur de vitesse, le produit laitier est acheminé vers les différentes unités de fabrication de crèmes dessert.

INSTRUMENTATION (8,5 points)

I. MESURE DU DÉBIT DE VAPEUR

- 1°) L'arrivée de vapeur dans les échangeurs est munie d'une mesure de débit repérée FT2 sur le schéma de l'ANNEXE 1 –*document réponse*- pages 6/10 et 7/10. La chaîne de mesure est constituée d'un diaphragme, associé à un transmetteur de pression différentielle, selon le schéma de l'ANNEXE 2, page 8/10.
 - a) Justifier la position sur l'ANNEXE 2 du transmetteur PDT 2 par rapport à la canalisation de vapeur, en indiquant la nature du fluide (liquide ou gaz) dans les tuyauteries reliant le transmetteur à la canalisation de vapeur.
 - b) Préciser le mode opératoire nécessaire à la mise en service et à l'étalonnage de cette chaîne de mesure, notamment les vannes utilisées.
 - c) Quel est le rôle des vannes manuelles repérées V6 et V7 sur l'ANNEXE 2, page 8/10 ?
- 2°) On décide de remplacer le transmetteur de pression différentielle PDT 2 dont l'étendue de mesure est jugée inappropriée. Dans les conditions de fonctionnement de l'installation, le diaphragme donne théoriquement une pression différentielle de 325 mbar pour un débit de vapeur de 800 kg .h⁻¹. En réalité, le débit maximum de vapeur peut atteindre 1 500 kg .h⁻¹. Déterminer l'étendue de mesure du transmetteur à adopter pour ce débit maximum de vapeur de 1 500 kg .h⁻¹.

- 3°) Le signal de sortie du transmetteur est un courant standard 4 – 20 mA que l'on veut proportionnel à la pression différentielle. Quel traitement doit-il subir pour assurer la linéarité de la chaîne de mesure du débit de vapeur ? Justifier la réponse.

II. CONTRÔLE DE LA COMBUSTION DANS LA CHAUDIÈRE

La production de vapeur est assurée par une chaudière à gaz, dont la qualité de la combustion est contrôlée par une analyse du taux de dioxygène O₂ résiduel dans les fumées.

- 1°) En fonctionnement normal, la mesure doit indiquer une teneur de 0,5 % en volume de dioxygène dans les fumées.
- Expliquer comment la mesure du taux de dioxygène dans les fumées peut permettre de contrôler le bon fonctionnement de la chaudière.
 - Quelles sont les conséquences d'un mauvais réglage de la combustion ?
- 2°) Pour effectuer l'analyse, un échantillon de fumée est prélevé à la base de la cheminée de la chaudière, à pression atmosphérique, à 460 °C. Il est traité et envoyé sur l'analyseur d'oxygène (sonde au zircon), distant de 15 m, puis rejeté à l'atmosphère.

Représenter la ligne d'échantillonnage permettant de transporter l'échantillon de fumée de la cheminée à l'analyseur, sachant que le constructeur précise que le gaz analysé doit être sec et dépoussiéré : justifier la présence de chaque élément.

- 3°) Un schéma de l'analyseur est fourni en **ANNEXE 3, page 8/10** : il s'agit d'un four tubulaire dont l'élément actif, la sonde au zircon, constitue le tube central. On rappelle que le fonctionnement de cet analyseur est basé sur les propriétés de l'oxyde de zirconium (zircon), à haute température : le zircon se comporte comme un électrolyte solide, ce qui permet d'appliquer la loi de Nernst lorsque le zircon se trouve en contact avec du dioxygène.

Dans le cas de l'analyseur représenté sur l'**ANNEXE 3, page 8/10**, le constructeur indique que le signal de sortie de l'analyseur est une tension E dont l'expression est :

$$E = 2,15 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln \frac{(PO_2)_{ref}}{(PO_2)_{mes}}$$

- E en volt
- T en K
- (PO₂) en Pa

- À partir de l'expression de la tension E ci-dessus et du schéma de l'**ANNEXE 3, page 8/10**, expliquer ce que représentent les deux termes (PO₂)_{ref} et (PO₂)_{mes}.
 - En quoi la mesure de la température par le thermocouple est-elle importante pour la qualité de la mesure du taux de dioxygène par l'analyseur ?
- 4°) Une mesure du taux de dioxygène dans les fumées fournit un signal E de 66 mV. Déterminer le pourcentage volumique de dioxygène dans les fumées, sachant que :
- les deux gaz (air et fumées) sont introduits à pression atmosphérique dans l'analyseur.
 - l'air contient 20,8 % en volume de dioxygène.
 - la température à l'intérieur de l'analyseur est de 813 K.

RÉGULATION (11,5 points)**III. IDENTIFICATION**

La régulation de la température du produit à la sortie de l'échangeur 1 (mesurée par TT2) sera assurée par la vanne V_1 qui agit sur le débit de vapeur. On se propose d'identifier le procédé selon la méthode de Broïda. L'ANNEXE 4, page 9/10, donne la réponse du procédé $m(t)$ obtenue lors d'un échelon de commande $y_r(t)$ d'amplitude 10 % avec un régulateur en MANUEL.

- 1°) À partir de l'analyse de la réponse indicielle de l'ANNEXE 4, page 9/10, calculer la valeur numérique des 3 paramètres de ce modèle.
- 2°) Écrire la fonction de transfert du procédé $H(p) = \frac{M(p)}{Y_r(p)}$ en fonction des paramètres déterminés à la question précédente.

IV. RÉGLAGES EMPIRIQUES

Les ANNEXES 5 et 6, page 10/10, représentent les réponses à un saut de consigne (régulateur en automatique) de la mesure d'un procédé commandé par un régulateur PID. Ces courbes ont été obtenues lors de réglages empiriques au cours desquels on a testé l'influence des actions intégrale et dérivée sur les performances de la régulation.

- 1°) L'ANNEXE 5, page 10/10, représentent deux réponses à un échelon de consigne d'amplitude ΔW égal à 10 %. Elles ont été obtenues à partir de deux valeurs différentes de T_i . ($T_i = 40$ s et 120 s)
 - a) Rappeler le rôle d'une action intégrale dans une boucle de régulation.
 - b) Indiquer, en justifiant la réponse, laquelle des deux courbes correspond à la plus grande valeur de T_i (soit 120 s).
- 2°) À l'ANNEXE 6, page 10/10, les essais ont été réalisés avec deux valeurs de T_d : 0 et 30 s. Quelle est la courbe pour laquelle $T_d = 0$ s ? Justifiez votre réponse.

V. RÉGLAGE DE LA STRATÉGIE EN BOUCLE SIMPLE

On suppose que la fonction de transfert du procédé s'écrit autour d'un point de fonctionnement :

$$H(p) = \frac{1,5e^{-Tp}}{1 + \tau p} \quad \text{avec } T = 68 \text{ s et } \tau = 118 \text{ s}$$

On cherche à déterminer les paramètres du régulateur PI mixte qui assureront une marge de gain de 6 dB pour cette boucle de régulation.

On rappelle que la fonction de transfert d'un correcteur PI mixte vaut :

$$C(p) = A \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right)$$

- 1°) Indiquer pourquoi le choix $T_i = \tau$ est judicieux, pour l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte $T(p) = C(p).H(p)$.
- 2°) En déduire l'expression de $T(p) = C(p).H(p)$ en fonction de A .

- 3°) Après avoir défini la marge de gain G_m sur un diagramme de Black simplifié, déterminer la valeur de A permettant d'obtenir une marge de gain de 6 dB.
- 4°) Calculer le facteur de réglabilité $k = \frac{T}{\tau}$ avec τ : constante de temps et T : le retard pur.
- 5°) Quelle conclusion, à partir de la valeur de k , peut-on tirer sur les performances d'une telle régulation du point de vue de la rapidité et de la stabilité de la boucle ?

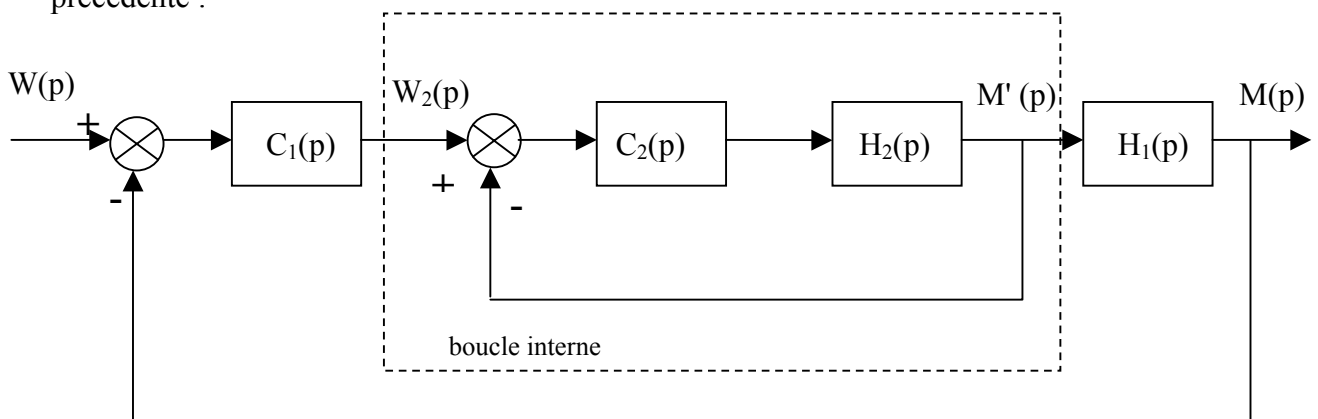
VI. STRATÉGIE COMPLEXE DE RÉGULATION

La distribution de vapeur, dans cette usine, est sensible aux variations des rythmes de production des divers ateliers utilisant la vapeur. Cela se traduit donc par des variations fréquentes de la pression d'alimentation en vapeur.

- 1°) On décide de mettre en place une régulation cascade. Justifier ce choix et préciser le type.
- 2°) Compléter le schéma de l'ANNEXE 1 –document réponse- pages 6/10 et 7/10, en rajoutant les éléments nécessaires à cette stratégie de régulation de température.
- 3°) Indiquer le sens d'action des régulateurs mis en place dans cette stratégie.

VII. ÉTUDE DE LA BOUCLE RAPIDE (BOUCLE INTERNE)

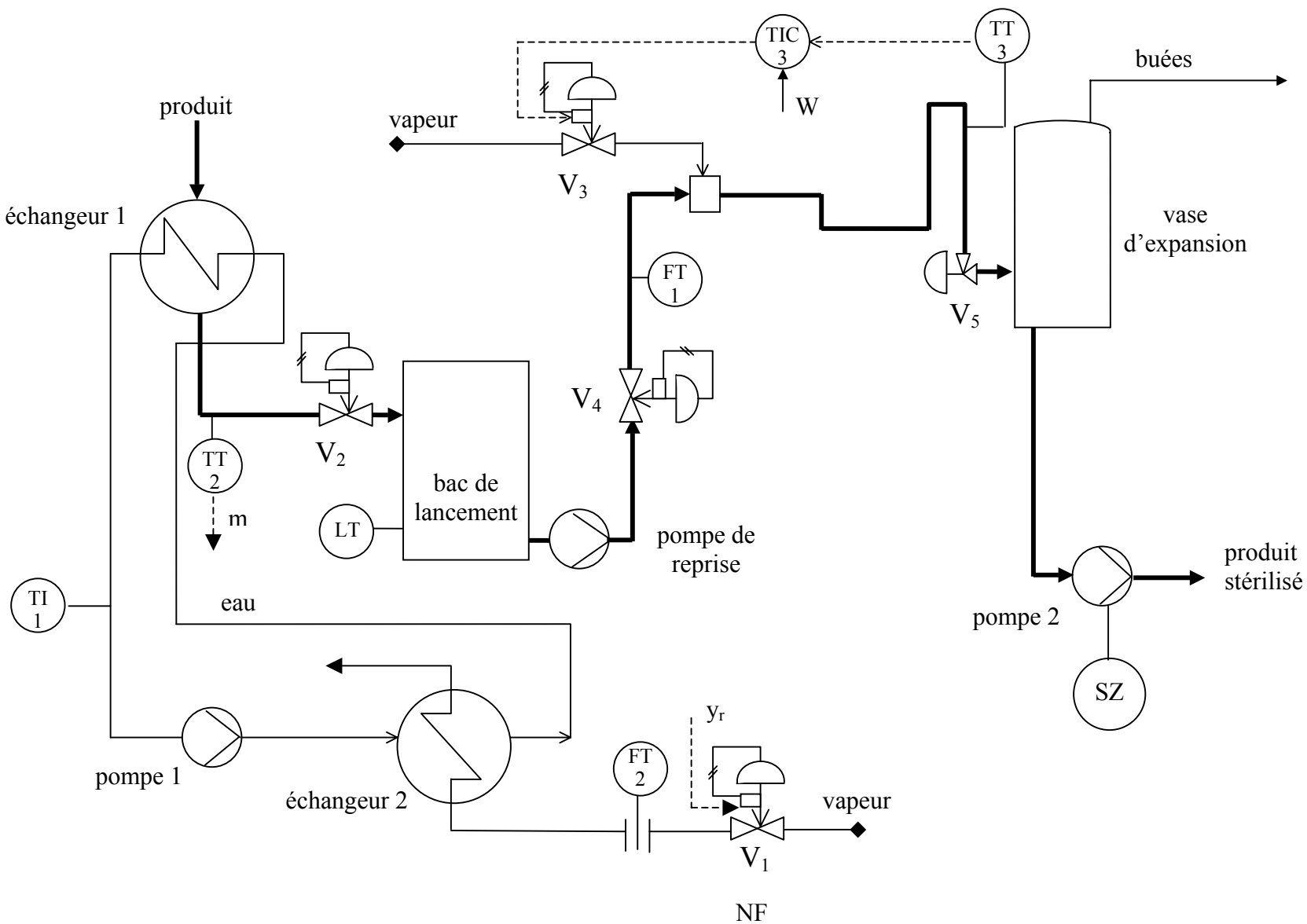
Le schéma fonctionnel suivant représente la régulation cascade étudiée à la question précédente :

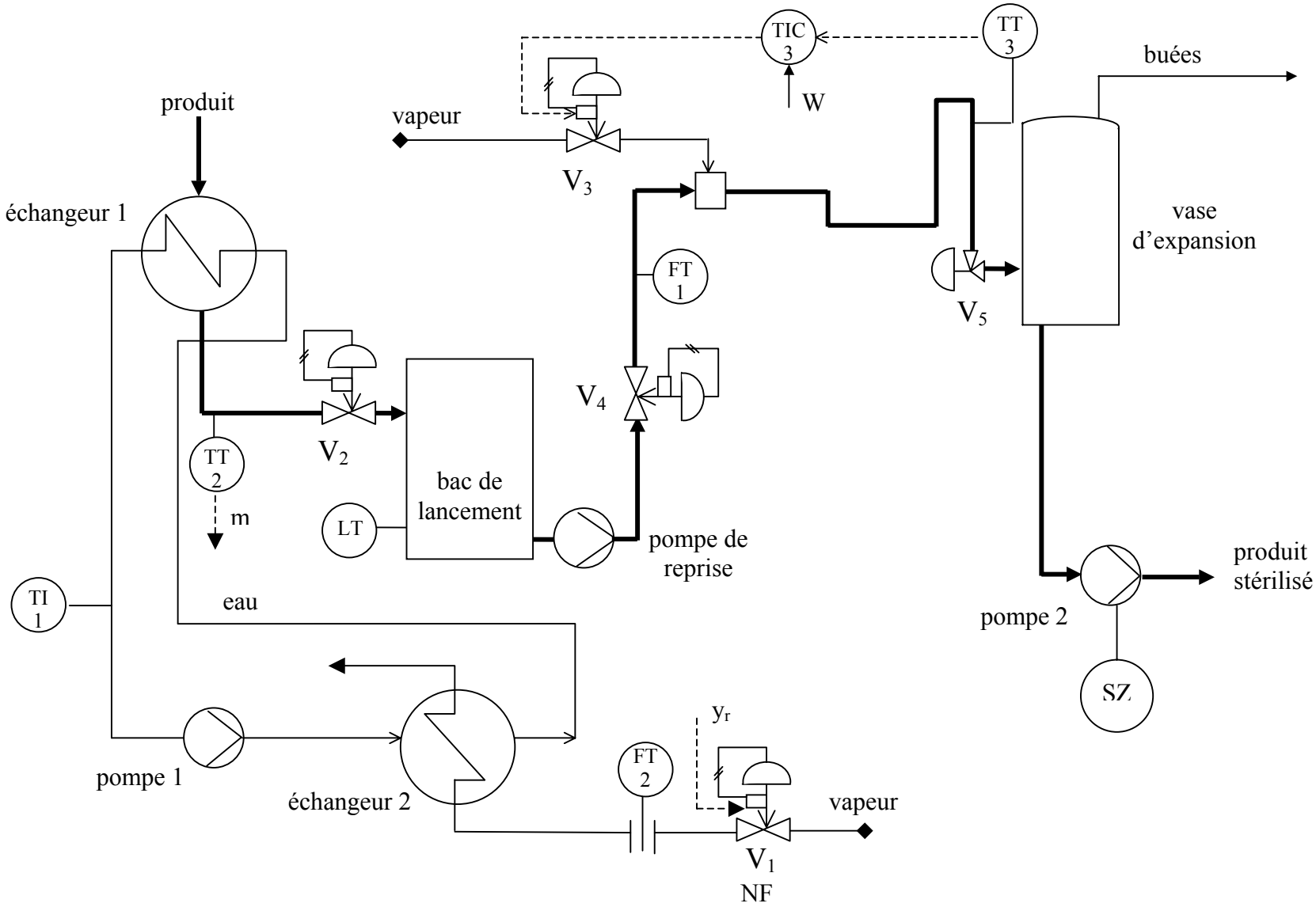


L'intérêt de mettre en place une régulation cascade consiste à remplacer la fonction de transfert $H_2(p)$ par une fonction en chaîne fermée $F_2(p)$ plus rapide.

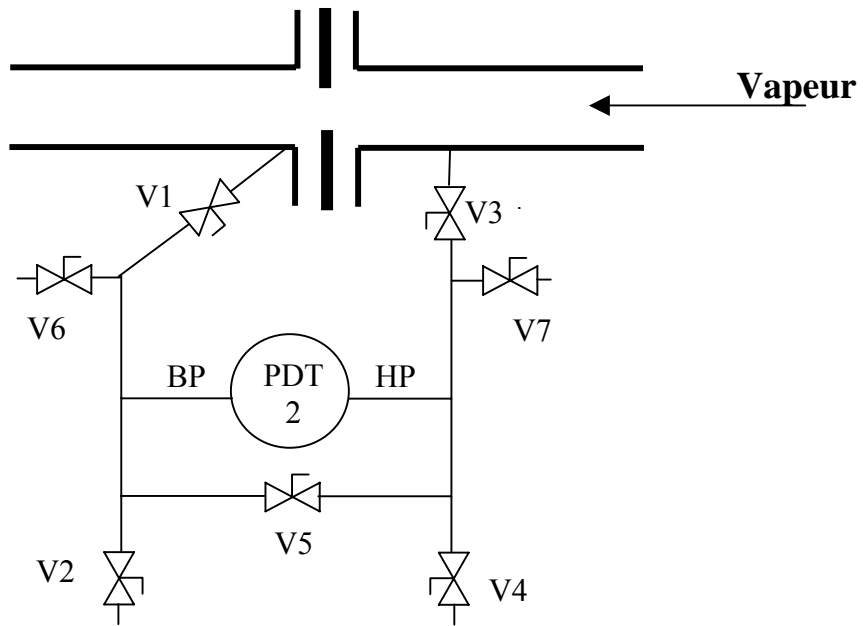
- 1°) Exprimer littéralement la fonction de transfert en boucle fermée $F_2(p) = \frac{M'(p)}{W_2(p)}$ en fonction de $C_2(p)$ et de $H_2(p)$.
- 2°) Sachant que $H_2(p)$ est un système du premier ordre de gain statique égal à 0,88 et de constante de temps 35 s, montrer que, si le correcteur esclave de fonction de transfert $C_2(p)$ est de structure PI mixte, $F_2(p)$ peut s'exprimer sous la forme d'un système du premier ordre de gain statique égal à 1 et de constante de temps τ_d . (On choisira $T_i = 35$ s)
- 3°) Calculer numériquement l'amplification A du correcteur $C_2(p)$ pour que : $\tau_d = 20$ s.

ANNEXE 1 : document-réponse

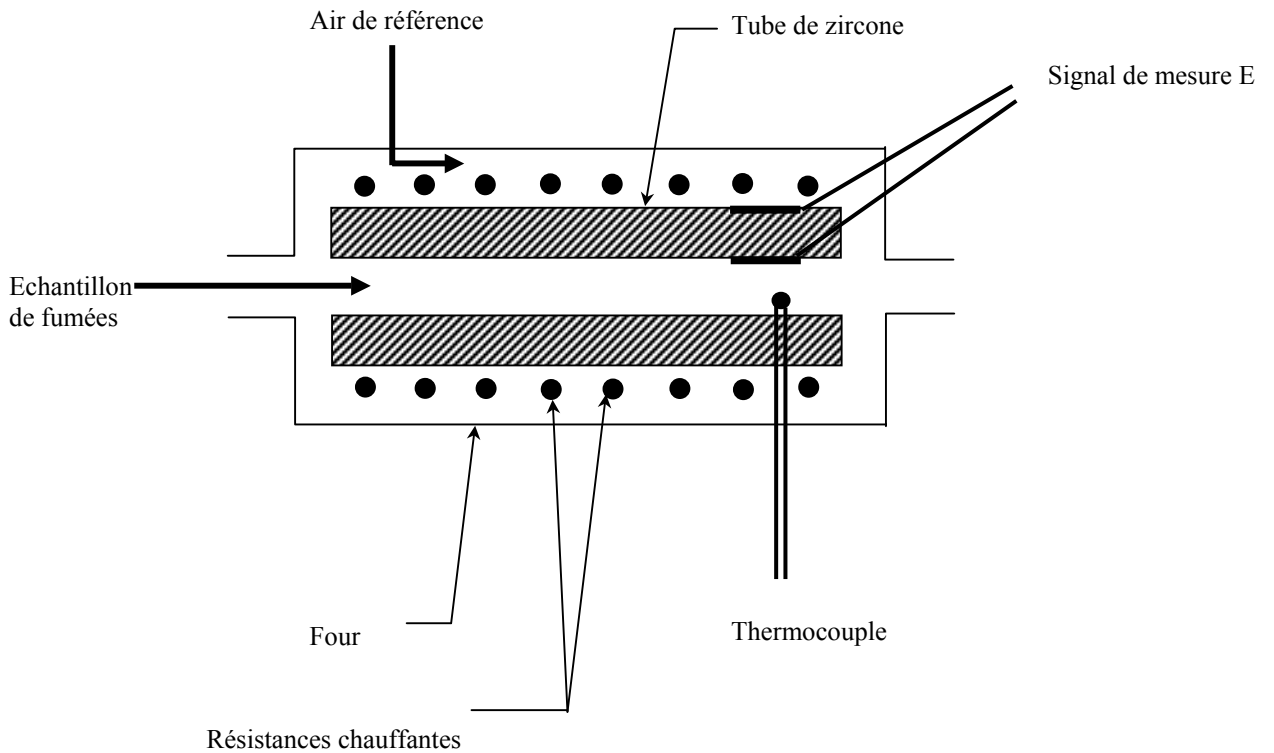




ANNEXE 2

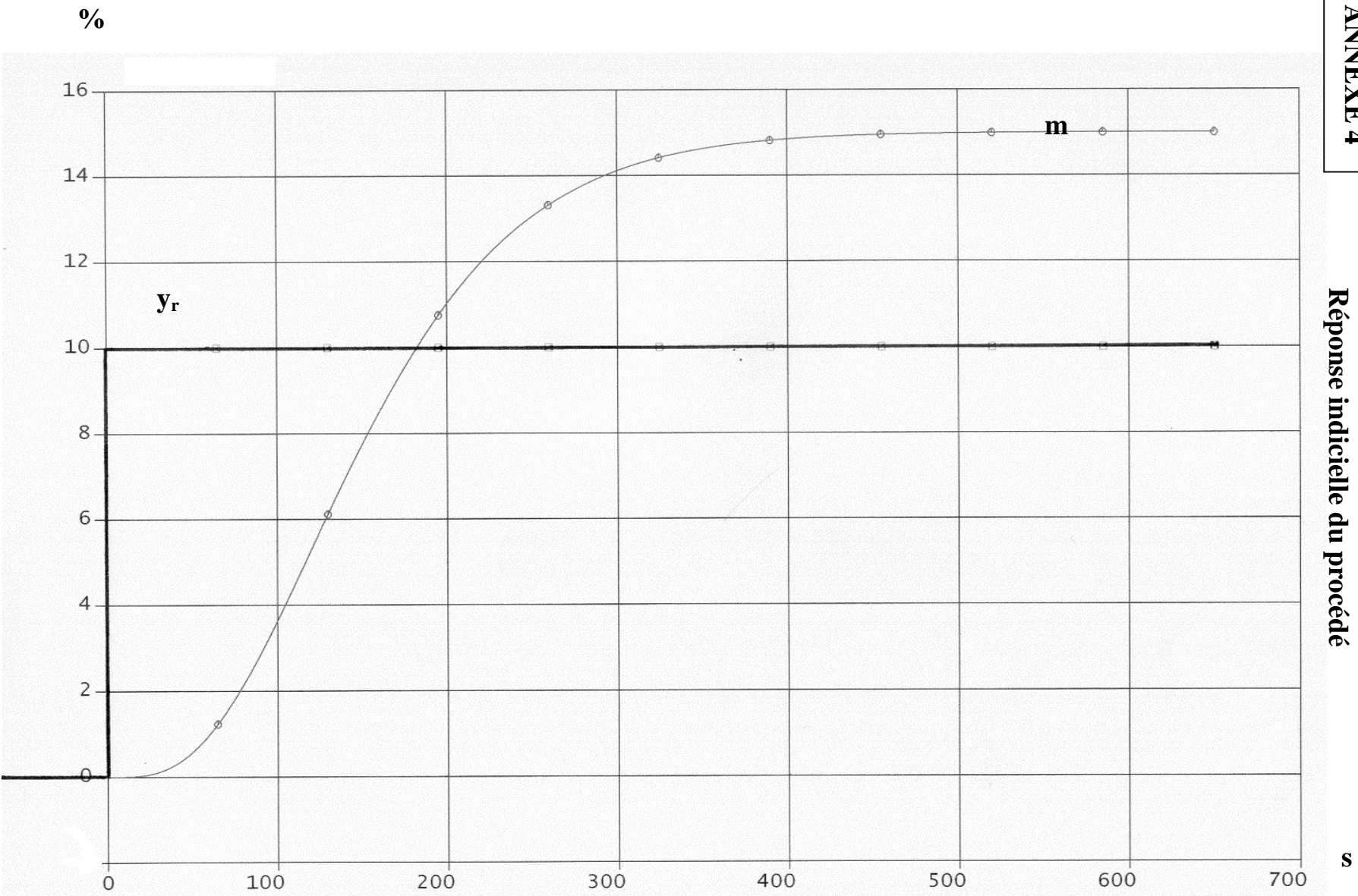


ANNEXE 3

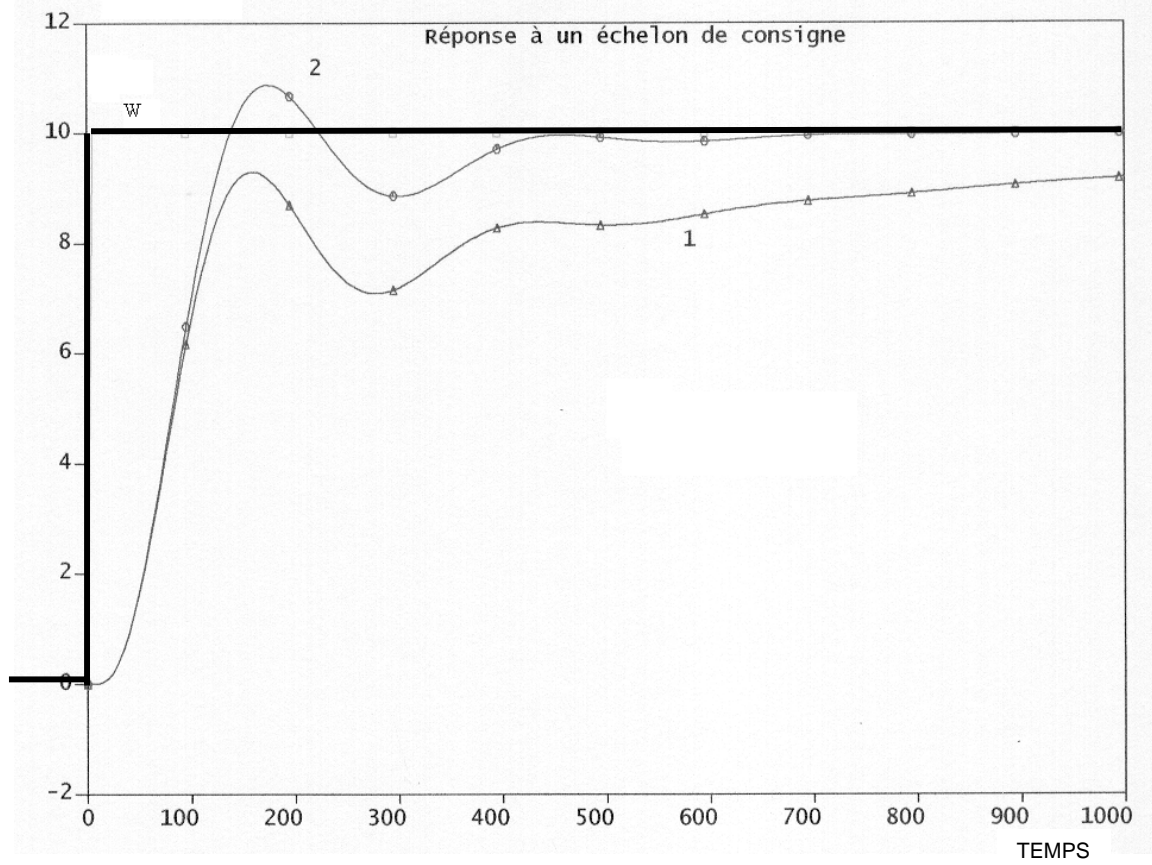


ANNEXE 4

Réponse indicielle du procédé



ANNEXE 5



ANNEXE 6

