

AGREGATION

SESSION 2003

CONCOURS INTERNE

Section : GENIE ELECTRIQUE

Option B : ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

ÉTUDE D'UN PROBLEME D'AUTOMATISATION

DUREE : 6 HEURES, COEFFICIENT : 1

Aucun document n'est autorisé.

*Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)
Convertisseur en Euro autorisé*

LIGNE DE GALVANISATION SOLLAC - ATLANTIQUE « DESVRES »

Ce sujet comporte 4 dossiers distincts :

- | | |
|---|------------|
| 📁 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé | (13 pages) |
| 📁 Documents annexes 1 à 11 | (12 pages) |
| 📁 Documents réponses A-1, A-2, A-3, B et C | (5 pages) |

Ce sujet comporte quatre parties indépendantes :

Partie **A** : Etude thermique simplifiée du bain de galvanisation,

Partie **B** : Cuve de galvanisation : exploitation pédagogique,

Partie **C** : Régulation de l'épaisseur du zinc,

Partie **D** : Procédé d'essorage, exploitation pédagogique.



Ces quatre parties sont à traiter obligatoirement mais le candidat traitera au choix la question A3 ou la question C3.

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police italique et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

LIGNE DE GALVANISATION SOLLAC - ATLANTIQUE « DESVRES »

Contexte industriel

L'usine SOLLAC-ATLANTIQUE de Desvres (Pas-de-Calais) fait partie du groupe ARCELOR, premier fabricant mondial d'acier.

Cette unité réalise la galvanisation à chaud et en continu de tôles destinées à la construction automobile, au secteur du bâtiment et de l'électroménager. Les tôles nues y sont acheminées par transport ferroviaire ou terrestre depuis l'unité SOLLAC de Dunkerque.

Description sommaire du procédé

Le procédé de galvanisation à chaud consiste à recouvrir, d'une couche de zinc, les deux faces d'une bande d'acier afin de la protéger contre la corrosion. Apparue en 1935, cette technique est aujourd'hui largement répandue, ainsi l'utilisation de tôles galvanisées dans le secteur de l'automobile a contribué à une très nette amélioration de la tenue à la corrosion des véhicules récents.

Une vue d'ensemble de la ligne de galvanisation SOLLAC-DESVRES est représentée à la page suivante.

Pour être pleinement efficace et satisfaire aux exigences des clients, le procédé de galvanisation requiert un certain nombre d'opérations :

1. dégraissage et décapage chimique assurant l'adhérence et la qualité du revêtement,
2. recuit en continu et refroidissement sous atmosphère neutre pour éliminer les contraintes mécaniques apparues lors du laminage,
- 3. revêtement par immersion à chaud et essorage pour obtenir l'épaisseur de zinc souhaitée,**
4. traitement thermique d'alliage zinc-fer, refroidissement (réalisation des composés intermétalliques),
5. skin-pass et/ou planage sous traction afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et d'imprimer la rugosité de la bande,
6. traitement chimique de surface (chromatation) pour la protection pendant le stockage,
7. inspection de surface.

Caractéristiques techniques

- production annuelle : 330 000 tonnes (en 2001)
- largeur des bobines : 0,5 à 1,5 m
- épaisseur : 0,6 mm à 5 mm
- longueur de la ligne : 300 mètres
- vitesse de défilement de la bande : 45 à 90 m.min⁻¹
- masse d'une bobine : 30 tonnes (24 tonnes à l'expédition)
- fonctionnement en continu.

Image de l'usine

A – ETUDE THERMIQUE SIMPLIFIEE DU BAIN DE GALVANISATION

Une vue en coupe de la cuve est représentée à l'annexe 1.

Le zinc est contenu dans la partie centrale d'une cuve recouverte d'acier inoxydable, autour de la zone centrale circule un bain de plomb liquide. Cette disposition permet un chauffage relativement homogène du zinc (points chauds limités par le bain-marie). Le chauffage du plomb est réalisé au moyen de résistances électriques.

Le contrôle de la température est confié à une boucle de régulation. Le dépôt du zinc sur la bande se fait par capillarité lors du passage de celle-ci dans le bain central, l'immersion de la bande doit durer environ de deux à quatre secondes.

La vitesse de formation de l'alliage fer-zinc croît très vite avec la température, à 450°C cette vitesse augmente de 10% environ lorsque la température croît de 5°C, dès lors une précision en température de +/- 2°C est souhaitable.

En fonctionnement normal la baisse du niveau de zinc est compensée par la descente de lingots neufs (masse environ égale à 2 tonnes), cette opération est réalisée à l'aide d'un palan électrique. Les lingots neufs contiennent une faible proportion d'aluminium (0,16% à 0,20%) et de plomb (0,003%).

A.1 Bilan énergétique simplifié

Le remplacement de la cuve s'effectue chaque année lors de l'arrêt de l'installation, le zinc et le plomb contenus étant préalablement récupérés grâce à des pompes spéciales et coulés sous forme de lingots qui sont réutilisés lors du redémarrage de l'installation. Les caractéristiques thermo physiques du zinc et du plomb sont données à l'annexe 2.

On rappelle que le changement de phase d'un métal pur (transformation solide liquide et réciproquement) nécessite deux formes d'énergie l'une nécessaire à l'élévation de température du corps jusqu'à la température de fusion (W_{es}), l'autre pour obtenir le passage effectif de l'état solide à l'état liquide (chaleur latente de fusion W_{fu}).

A.1.1 *Au vu des informations relatives à la durée d'immersion, **justifier** les dimensions de la cuve.*

A.1.2 *Le zinc étant supposé à l'état solide, **calculer** en wattheures l'énergie W_{ezs} , nécessaire pour amener la masse de zinc récupérée ($M_z = 40$ tonnes), jusqu'à la température de fusion (température initiale égale à la température ambiante, $\theta_o = 20^\circ\text{C}$).*

A.1.3 ***Calculer** en wattheures l'énergie supplémentaire W_{fusz} pour amener effectivement la masse précédente à l'état liquide (cette opération s'effectue à température constante $\theta = \theta_{fuz}$).*

A.1.4 ***Déterminer** W_{ezi} , correspondant à l'énergie nécessaire pour amener le zinc liquide à sa température finale ($\theta_{zinc} = 460^\circ\text{C}$). En **déduire** l'énergie utile totale à fournir à la charge, W_{uz} , lors de la phase de fusion.*

A.1.5 *La puissance de chauffe vaut 360 kW en comptant sur un rendement moyen de 70% **indiquer** quel serait le temps théorique de fusion dans l'hypothèse d'un échauffement adiabatique du zinc (transmission sans pertes) et isotherme (même température en tout point du matériau).*

A.1.6 *Le temps réel de fusion est de 100 heures, **comparer** au résultat précédent et conclure sur la validité du modèle retenu.*

A.2 Etude thermique en phase de pré-fusion

Lors de redémarrage de l'installation 50 tonnes de plomb liquide à 470°C sont coulées autour de la zone contenant les lingots de zinc ; la fusion du plomb est réalisée à l'extérieur de la cuve dans des creusets spéciaux. Après la coulée du plomb, un couvercle avec isolation thermique renforcée est placé au dessus de la cuve de manière à diminuer le temps de mise en fusion du zinc. Durant les premiers instants de la coulée les résistances électriques ne sont pas mises sous tension.

A.2.1 Le plomb coulé dans la partie externe de la cuve se refroidit au contact des parois en acier, une partie retrouve donc l'état solide, on néglige le transfert thermique par conduction à travers le fond de la partie centrale, et on se place dans le cadre d'un régime adiabatique. En **déduire** la température d'équilibre du plomb et des parois, θ_{eq} .

A.2.2 En prenant comme température initiale de parois la température ambiante, **calculer** l'énergie, W_{ep} , perdue par le plomb lorsque sa température passe de 470°C à la température de fusion.

A.2.3 **Calculer** l'énergie acquise par les parois de la cuve en contact avec le plomb, W_{pa} , (masse $M_{pa} = 9$ tonnes, chaleur massique moyenne $C_{pa} = 575 \text{ J.K}^{-1}.\text{°C}^{-1}$).

A.2.4 **Déterminer** la masse de plomb qui reste à l'état liquide M_{pbl} .

A.2.5 Débute ensuite une nouvelle phase avec la mise sous-tension des résistances. La remontée en température du plomb s'effectue de manière progressive, en faisant évoluer le point de consigne de 10°C, environ toutes les deux heures. Compte tenu de la technique de fabrication de la cuve (assemblage de tôles soudées), **justifier** cette procédure.

A.3 Etude thermique simplifiée de la phase de fusion

Les 8 lingots de zinc récupérés (masse unitaire égale à 5 tonnes) sont placés dans la cuve conformément à la figure 1, les parois intérieures échangent par rayonnement une partie de l'énergie nécessaire à la fusion du zinc. On ne s'intéresse qu'à l'échange entre les faces A1 et L1. Les lingots sont assimilés à des cubes d'arête $b = 0,9 \text{ m}$.

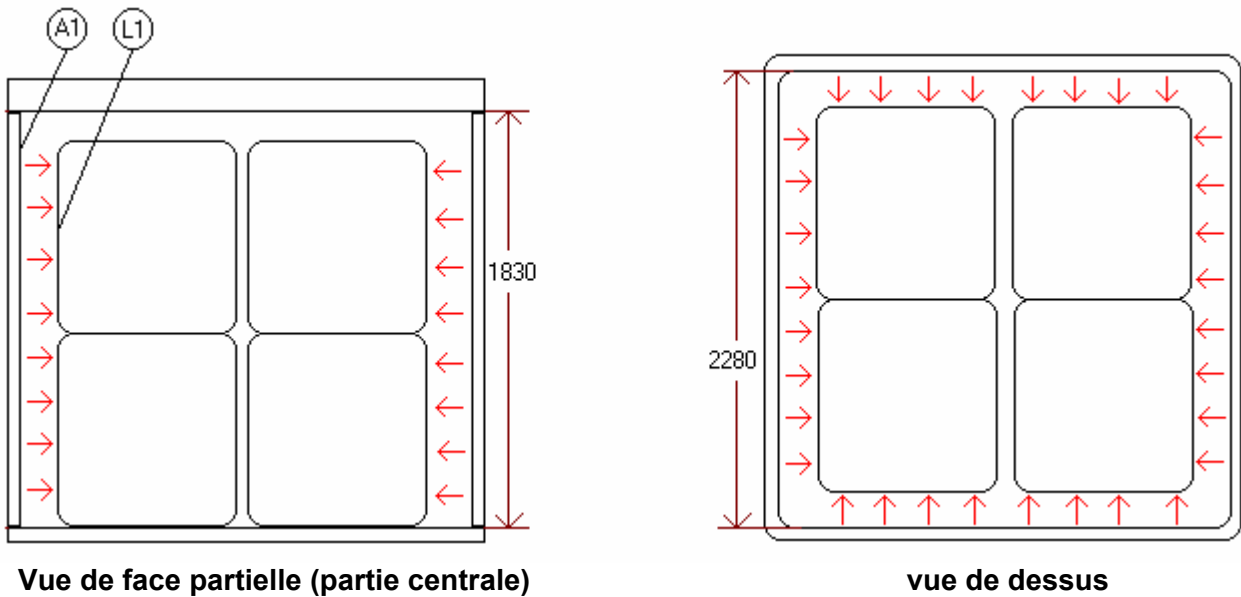


Figure 1

On rappelle que la puissance nette échangée par rayonnement entre deux surfaces planes S_1 , et S_2 est donnée par la relation suivante :

$$P_{1 \rightarrow 2} = \sigma \cdot S_1 \cdot F_{\epsilon} \cdot F_{12} \cdot [T_1^4 - T_2^4]$$

- $P_{1 \rightarrow 2}$: puissance nette échangée en W,
- S_1, S_2 : surfaces d'échange en m^2 ,
- T_1, T_2 : température absolue de S_1 et S_2 en degré Kelvin ($T_i = \theta_i + 273,15$ avec θ_i en $^{\circ}\text{C}$),
- σ : constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
- F_{ϵ} : facteur d'émissivité qui dépend des émissivité et absorptivité de la source (ϵ_1, α_1) et de la charge (ϵ_2, α_2),
- F_{12} : facteur de forme ou facteur d'angle qui dépend des dimensions et de la position relative de S_1 et S_2 .

Dans le cas de corps assimilés à des corps « gris » (émissivité ϵ_i égale à l'absorption α_i et indépendante de la longueur d'onde) on introduit le facteur de forme gris F :

$$F = F_{\varepsilon} \cdot F_{12} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \frac{S_1}{S_2}}$$

A.3.1 Les abaques donnent pour F_{12} une valeur égale à 0,88. **Déterminer** pour les faces A1 et L1 la valeur de F , **en déduire** la puissance surfacique P_{sz} absorbée par le zinc grâce au rayonnement de ces parois ; on prendra $\theta_{acier} = 470^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{acier} = 0,6$; $\theta_{zinc} = 20^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{zinc} = 0,25$.

A.3.2 Un calcul plus poussé montre que la densité de flux de chaleur absorbé en surface des lingots est égale à 15 kW.m^{-2} . **Interpréter** les différences avec le résultat de la question précédente.

A.3.3 On néglige la transmission de chaleur par conduction à travers le fond de la cuve et on assimile les quatre lingots situés dans un même plan à un mur semi infini ce qui revient à négliger les effets de bord et à considérer que la chaleur se diffuse au sein du matériau dans une direction privilégiée perpendiculairement à la surface où pénètre le flux de chaleur Φ_0 .

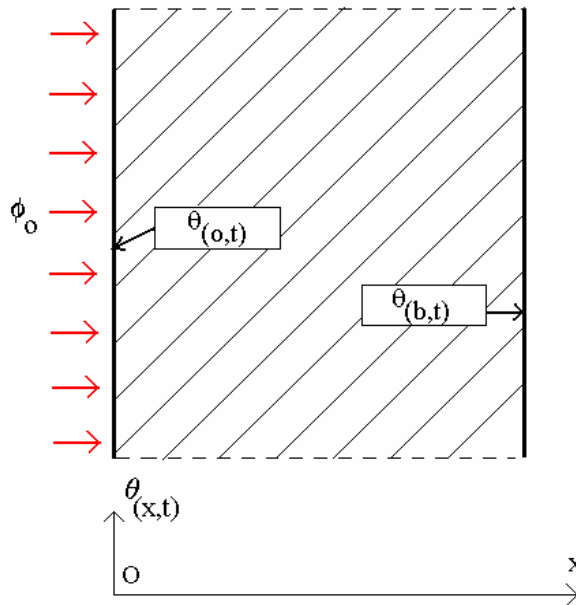


Figure 2

La détermination de la température à un endroit quelconque d'un corps solide épais ne peut se faire à l'aide d'un modèle thermique simple (modèle à un nœud avec une résistance et une capacité thermique par exemple), il faut résoudre l'équation de la diffusion de la chaleur aux dérivées partielles. Dans le cas d'une densité de flux de chaleur constante en surface, on peut montrer que le profil de température dans le matériau dépend de la relation suivante :

$$\theta_{(x,t)} = \theta_0 + \frac{2\phi_0}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{at}{\pi}} e^{-u^2} - \frac{x}{2}(1 - \text{erfu}) \right]$$

$$\text{avec } u = \frac{x}{2\sqrt{at}}$$

où : - erf u : (intégrale de la courbe de Gauss) = $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-v^2} \cdot dv$ (valeurs en annexe 3),

- ϕ_0 : densité de flux de chaleur en W.m^{-2} ($P_{1 \rightarrow 2} / S_2$ avec $P_{1 \rightarrow 2} = \Phi_0$),

- λ : conductivité thermique du matériau en $\text{W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$,

- a : diffusivité thermique du matériau en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, ($a = \frac{\lambda}{\omega C}$ avec C chaleur massique et ω masse volumique).

Dans le domaine de température étudié on donne $\varphi_o = 15 \text{ kW.m}^{-2}$, $a_{\text{moy}} = 3,55.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, $\lambda_{\text{moy}} = 105 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. **Calculer** la valeur du temps t_f pour que la fusion commence à intervenir à la surface des lingots (face L1).

A.3.4 **Calculer**, au même moment, la température sur la face opposée d'un lingot, $\theta_{(b,t_f)}$ et **conclure**.

A.3.5 Le coefficient de transfert par convection dans les métaux liquides est compris dans une fourchette allant de 6 600 à 110 000 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. **Indiquer** l'évolution prévisible de la température à partir de l'instant t_f .

A.3.6 À l'avenir il est fort probable que des directives européennes réglementent sévèrement l'usage du plomb en milieu industriel. **Proposer** une solution moderne de remplacement qui garantirait à la fois un bon rendement et au niveau de la charge, une puissance surfacique satisfaisante. **Faire un croquis** pour en donner le principe.

A.4 Elaboration d'un modèle dynamique de connaissance pour le régime de fusion

Lorsque le régime permanent est atteint ($\theta_{\text{zinc}} = 460\text{°C}$) le couvercle isolant est ôté, les cylindres de guidage de la bande sont placés dans la cuve et un apport complémentaire de zinc est effectué. On suppose pour l'instant que la bande n'est pas présente. Pour de petites variations de température, le schéma équivalent simplifié traduisant les échanges thermiques au niveau de la cuve de galvanisation est donné à la figure 3.

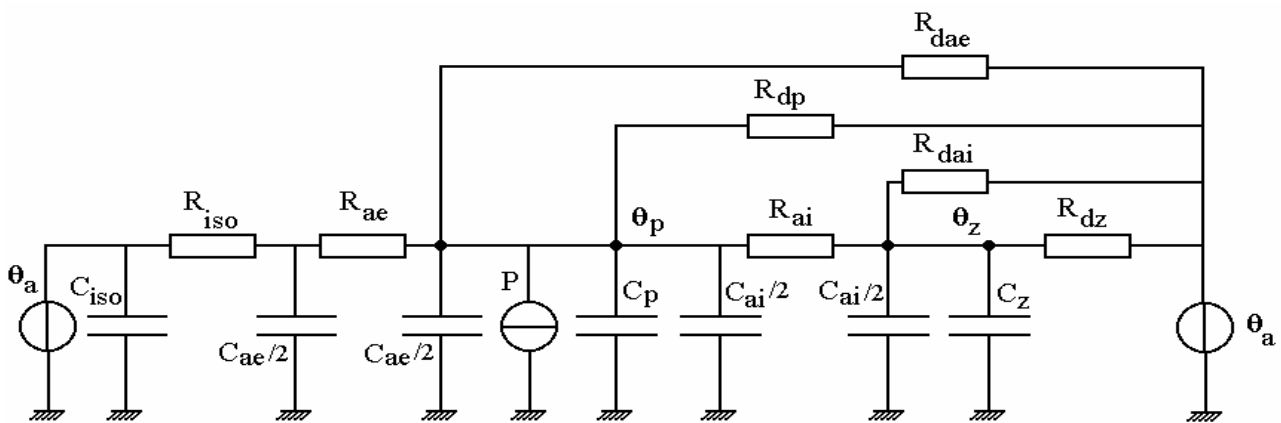


Figure 3

Avec :

C_{iso} , C_{ae} , C_{ai} respectivement capacité thermique de l'isolation, de la paroi externe de la cuve, de la paroi interne (zone « zinc »),

R_{iso} , R_{ae} , R_{ai} respectivement résistance thermique de l'isolation, de la paroi externe, de la paroi interne,

C_p , C_z respectivement capacité thermique du bain de plomb, de celle du bain de zinc,

R_{dae} , R_{dp} , R_{dai} , R_{dz} , respectivement résistances liées aux déperditions de la paroi externe, de la surface du plomb, de la paroi interne de celle du zinc,

P , puissance apportée par les résistances,

θ_a , température ambiante ($\theta_a = \theta_o = \text{constante}$).

A.4.1 L'épaisseur moyenne de la couche isolante, e_{iso} , entourant la cuve est de 25 cm avec une surface équivalente, S_{iso} , de 16,5 m^2 , **calculer** la résistance thermique R_{iso} sachant que la conductivité du matériau, λ_{iso} , vaut 0,2 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ (béton vermiculite). Les résistances thermiques additionnelles (béton, air...) sont évaluées à 0,07 °C.W^{-1} **donner** en watts l'ordre de grandeur des déperditions à travers les parois externes de la cuve (P_{ds}).

A.4.2 La partie intérieure de la cuve (acier au carbone plus tôle en acier inoxydable) a une épaisseur de 50 mm (e_{ai}), sa conductivité thermique moyenne, λ_{ao} , est de $35 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, sa surface équivalente est $S_{ai} = 14,8 \text{ m}^2$ **calculer** la résistance thermique R_{ai} . **Préciser** à quelle(s) condition(s) on peut négliger cet élément du modèle.

A.4.3 On souhaite calculer les résistances thermiques R_{dae} , R_{dp} , R_{dai} et R_{dz} qui rendent compte des déperditions thermiques entre les surfaces horizontales (métaux en fusion, parties métalliques supérieures de la cuve) et l'air ambiant. Le coefficient moyen de pertes par convection h_c sera pris égal à $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ d'autre part pour les pertes par rayonnement on prendra $F_{12} = 1$, $\varepsilon_{zinc} = 0,3$ et $\varepsilon_{ambiant} = 0,95$. **Montrer** que $F \approx \varepsilon_{zinc}$. **Compléter** le document-réponse A-1.

A.4.4 **Compléter** le document-réponse A-2 pour déterminer les capacités thermiques du modèle.

A.4.5 Compte tenu des résultats précédents, **montrer** que la cuve est modélisable par un simple premier ordre.

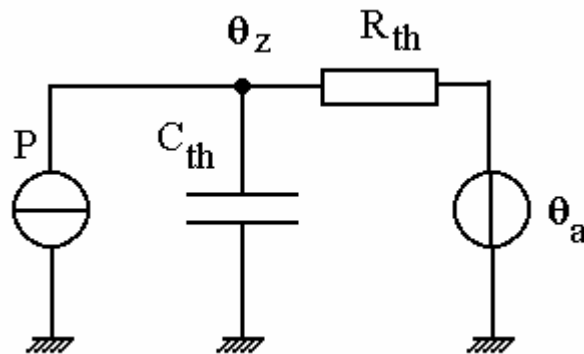


Figure 4

A.4.6 **Préciser** la valeur de R_{th} , et de C_{th} en fonction des éléments introduits précédemment. **Calculer** τ : constante de temps thermique dominante du système.

A.4.7 **Discuter** de la validité du modèle précédent lorsque la température de la bande à l'entrée du bain est différente de celle du zinc, **préciser** les modifications à apporter au modèle pour prendre en compte ce type de perturbation. **Identifier** d'autres types de perturbation et **discuter** de leur influence.

A.5 Régulation de la température du bain de galvanisation

Pour de petites variations de température du bain de zinc, θ_z^* : ($\theta_z = \theta_{z0} + \theta_z^*$) autour de sa valeur nominale (θ_{z0}), un essai sur site a effectivement permis de modéliser l'ensemble du dispositif par un comportement du type « premier ordre dominant ». On adopte désormais le schéma bloc suivant :

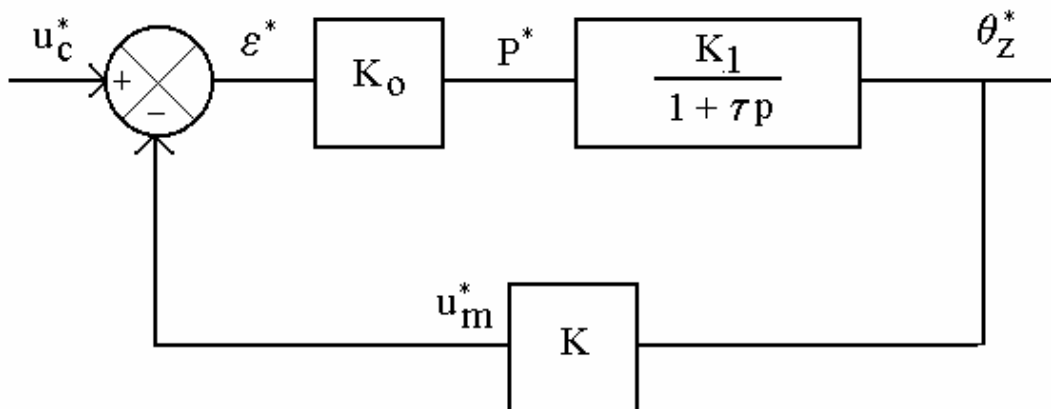


Figure 5

A.5.1 Au vu des contraintes du cahier des charges, **justifier** la présence d'une boucle de régulation en température.

A.5.2 **Donner** la signification physique de K_1 , K_o , K et de τ .

A.5.3 Les résistances sont alimentées à travers un gradateur à commande synchrone à temps de découpage t_c constant (appelé aussi gradateur à ondes pleines à période de découpage fixe), **justifier** le choix de ce type de modulateur d'énergie.

A.5.4 **Calculer** la transmittance à retour unitaire du système en boucle fermée $H_{BF(p)}$,
 $H_{BF(p)} = u_{m(p)}^* / u_{c(p)}^*$.

A.5.5 La température de consigne étant constante, **en déduire** l'erreur statique avec :

- $K_o = 3,6 \cdot 10^4 \text{ W.V}^{-1}$
- $K_1 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C.W}^{-1}$
- $\tau = 1,2 \cdot 10^5 \text{ s}$
- $K = 2 \cdot 10^{-2} \text{ V.}^\circ\text{C}^{-1}$

A.5.6 Afin d'améliorer les performances de la boucle on souhaite introduire en sortie du comparateur un correcteur proportionnel $C_{(p)}$ avec $C_{(p)} = K_c$. **Déterminer** la valeur à donner à K_c pour réduire l'erreur statique à une valeur inférieure à 0,4%.

A.5.7 Le choix se porte maintenant sur un correcteur PI avec $C_{(p)} = K_c(1 + 1/T_i p)$, **montrer** alors que la transmittance en boucle fermée du système corrigé peut se mettre sous la forme suivante :

$$H_{BF(p)} = \frac{(1 + p/\omega_1)}{(1 + 2mp/\omega_o + p^2/\omega_o^2)}$$

Expliciter m , ω_o et ω_1 en fonction de K_o , K_1 , K , K_c , τ et de T_i . La valeur de K_c est réglée à 22,1 celle de T_i à 9 999 s **calculer** la valeur de m , **justifier** le choix de ces valeurs particulières.

A.5.8 **Simplifier** l'expression précédente et **tracer** la réponse en température lorsque la consigne passe de 445°C à 455°C (Document Réponse A-3).

A.5.9 **Indiquer** la valeur du temps de réponse à 5% ainsi que celle du dépassement. **Dire** si ce réglage est correct. Sur un régulateur moderne, **préciser** quelle fonction il faudrait mettre en œuvre afin d'empêcher le dépassement de la consigne.

Rappels de quelques transformées de Laplace :

- $\frac{U_c}{p}$ $f(t) = U_c \cdot \Gamma(t)$ (échelon d'amplitude U_c)
- $\frac{1 + a.p}{p.(1 + T.p)^2}$ $f(t) = 1 + \left(\frac{(a - T)}{T^2} t - 1 \right) \cdot e^{-t/T}$

B- CUVE DE GALVANISATION : EXPLOITATION PEDAGOGIQUE

B.1 Etude de la transposition didactique

Dans cette partie on définit la problématique permettant de transposer en milieu scolaire le thème relatif au procédé de galvanisation ; la frontière du système est limitée à la cuve de galvanisation.

A cet effet une maquette à échelle réduite est réalisée selon les plans de l'annexe 4. L'idée d'une cuve à deux compartiments est conservée, par contre, pour des questions évidentes de sécurité, le plomb est remplacé par de l'huile; le zinc quant à lui est remplacé par de l'eau, le chauffage est réalisé au moyen de trois thermoplongeurs placés dans l'huile. Un tableau donné à l'annexe 5 décrit les caractéristiques techniques du système réel et du banc didactique.

B.1.1 *Par rapport au cahier des charges de l'installation réelle et aux solutions techniques apportées, identifier les points déterminants pouvant être abordés à travers la maquette didactique.*

B.1.2 *En supposant que l'eau et l'huile sont initialement à la température ambiante, à l'aide d'un calcul approché (pertes externes de l'ordre de 15%) vérifier que les temps de montée en température sont compatibles avec les situations pédagogiques rencontrées en lycée technique. Reprendre cette*

question en supposant que l'eau est initialement sous forme de glace à 0°C (simulation de la mise en fusion du zinc), on rappelle que la chaleur latente de fusion de la glace L_{fus} vaut 334 kJ. kg⁻¹.

B.1.3 La mesure de température de l'huile (θ_h) et de l'eau (θ_e) est confiée à deux thermocouples. Deux modèles sont proposés en annexe 6, **choisir** la version convenant à l'application (respect de la similitude du comportement transitoire), **donner** les éléments techniques pour l'implantation sur la maquette (dimensions, accessoires, câbles...).

B.1.4 **Préciser** le type d'option à prévoir sur le régulateur Shinko (Annexe 7) de façon à pouvoir piloter le modulateur d'énergie (Gradipak).

B.1.5 Le régulateur retenu ne possédant qu'une seule sortie analogique, **indiquer** les modules nécessaires à la visualisation sur oscilloscope de θ_e et θ_h . On rappelle que le signal délivré par un thermocouple est de l'ordre de quelques millivolts et qu'il peut être fortement bruité.

B.1.6 Afin de vérifier la similitude de la maquette réalisée par rapport à l'installation réelle, on introduit un certain nombre de points de comparaison (fonctionnels, matériels, temporels...), chacun d'eux est repéré par un axe sur une figure géométrique appelé « polygone de similitude ». Chaque élément de comparaison devra être apprécié sur une échelle arbitraire de 1 à 5 (niveau 1 : similitude inexistante, niveau 5 : similitude maximale). A partir de l'annexe 5, **compléter** le document réponse B.

B.1.7 **Identifier** les « invariants » (critères de niveau 5), les distorsions amenées par la transposition didactique (critères de niveau 1) et **conclure** sur la crédibilité du système didactique.

B.1.8 La fonction d'usage du système réel (« déposer en continu une couche de zinc sur une bande d'acier ») n'est évidemment pas respectée, **indiquer** par quels moyens on pourrait néanmoins simuler les perturbations liées au défilement de la bande et la descente du lingot dans le bain.

B.2 Exploitation pédagogique du système didactique

Ce thème est destiné à des sections de terminale de baccalauréat spécialité « Génie Electrotechnique ». Des extraits du référentiel, donnés à l'annexe 8, mettent en relief les points sur lesquels seront centrées les activités pédagogiques à mettre en œuvre. Celles-ci privilégieront évidemment les séances en salle d'essais de systèmes conformément au module B2.

B.2.1 De manière synthétique, **indiquer** les éléments (contenus) et méthodes (outils de communication, type d'activités proposées...) permettant de présenter aux apprenants le contexte industriel (ligne de galvanisation à chaud).

B.2.2 On s'intéresse à l'étude globale du système, les compétences à acquérir (ou à conforter) sont repérées au paragraphe 2.1.3 du référentiel. **Proposer** le plan (une page maximum) d'une séance pédagogique en y décrivant à chaque étape le type d'activité proposée et le temps consacré.

B.2.3 En se limitant aux compétences 2.1.3 (repères h à j inclus) **rédiger** une fiche de travail à remettre aux élèves dans laquelle devront figurer :

- les questions préparant la phase expérimentale,
- les moyens de mesurage et documents mis à disposition,
- les grandeurs pertinentes à relever, et/ou à mesurer,
- les schémas des montages de mesure,
- les réglages à effectuer sur le système,
- les analyses et commentaires à fournir,
- les critères d'évaluation.

B.2.4 **Rédiger** une fiche de correction relative au travail précédent.

C- REGULATION DE L'ÉPAISSEUR DE ZINC

Description du procédé.

A la sortie du bain de zinc, deux buses soufflent un fluide gazeux (air ou azote) afin de refouler l'excès de zinc déposé sur la bande (cf. figure 6). Ces deux buses sont légèrement inclinées afin d'éviter leur pollution par le zinc, la forme de leurs lèvres est spécialement étudiée pour assurer un essorage optimal jusqu'aux rives.

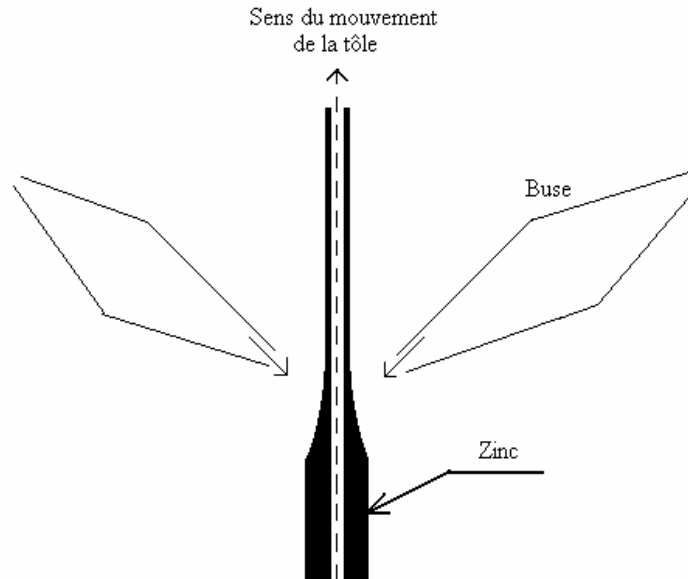


Figure 6

La mesure de l'épaisseur des revêtements de zinc de chaque face se fait par fluorescence X (voir système de mesure complet Annexe 9). Mais cette mesure ne peut être effectuée (la plupart du temps) qu'une fois la tôle galvanisée refroidie. C'est la raison pour laquelle les jauges de mesure doivent être placées en aval de la cuve de galvanisation. Ceci entraîne donc un retard important entre l'action sur la pression d'air au niveau des buses et la mesure de l'effet correspondant. Ce retard (variable) est le principal problème posé à la régulation d'épaisseur du dépôt de zinc.

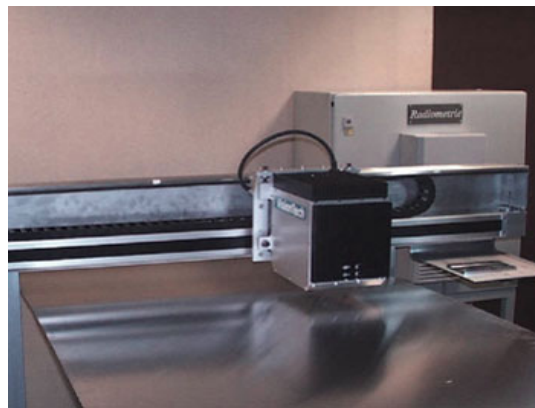


Figure 7 : Mesure d'épaisseur en ligne (www.radiometrie.com)

C.1 Modélisation statique du procédé d'essorage

Une étude expérimentale a pu montrer que la masse surfacique du zinc déposé, ($m = M/S$), peut être approchée par la relation suivante :

$$m = k.D.\sqrt{\frac{V}{P_f}} + \xi_m$$

où :

- k est une constante de proportionnalité,
- D est la distance entre la buse et la bande,
- P_f est la pression du fluide injecté,
- ξ_m traduit les effets des erreurs de modélisation ou des perturbations non prédictibles.

C.1.1 **Justifier** qualitativement la relation empirique précédente (influence de P_f , V et de D).

C.1.2 **Calculer** les dérivées partielles suivantes :

$$\frac{\partial m}{\partial D}, \frac{\partial m}{\partial V}, \frac{\partial m}{\partial P_f}$$

C.1.3 On considère un point de repos (P_{fo} , V_o , D_o), **montrer** que m peut se mettre sous la forme qui suit :

$$m = k \cdot D_o \cdot \sqrt{\frac{V_o}{P_{fo}}} + \alpha \cdot \Delta D + \beta \cdot \Delta V - \mu \cdot \Delta P + \xi_m$$

Où ΔD , ΔV , ΔP représentent les variations autour du point de repos.

C.1.4 **Exprimer** α , β , μ . **En déduire** une conséquence importante si la commande du procédé est réalisée grâce à la pression du fluide.

C.2 Régulation d'épaisseur à l'aide d'un prédicteur de Smith

La pression du gaz envoyé par les buses est réglée par une boucle interne de pression, dont le comportement est assimilable à un premier ordre. L'industriel dispose de modèles statiques permettant de fixer la consigne de pression à appliquer en fonction du revêtement souhaité, de la vitesse de la ligne, et de la pression des buses. Cette consigne de pression est fixée par l'opérateur. C'est donc autour de ce point de fonctionnement (P_{fo}) que va venir jouer la régulation en calculant et en appliquant les corrections de pression comme l'indique la figure 8.

C.2.1 La distance (L) entre le dispositif d'essorage pneumatique et la jauge d'épaisseur de zinc est égale à 59,5 m, pour une vitesse de ligne V de $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, **calculer** le retard pur introduit, noté ψ .

C.2.2 **Identifier** l'origine des perturbations (cf. figure 8).

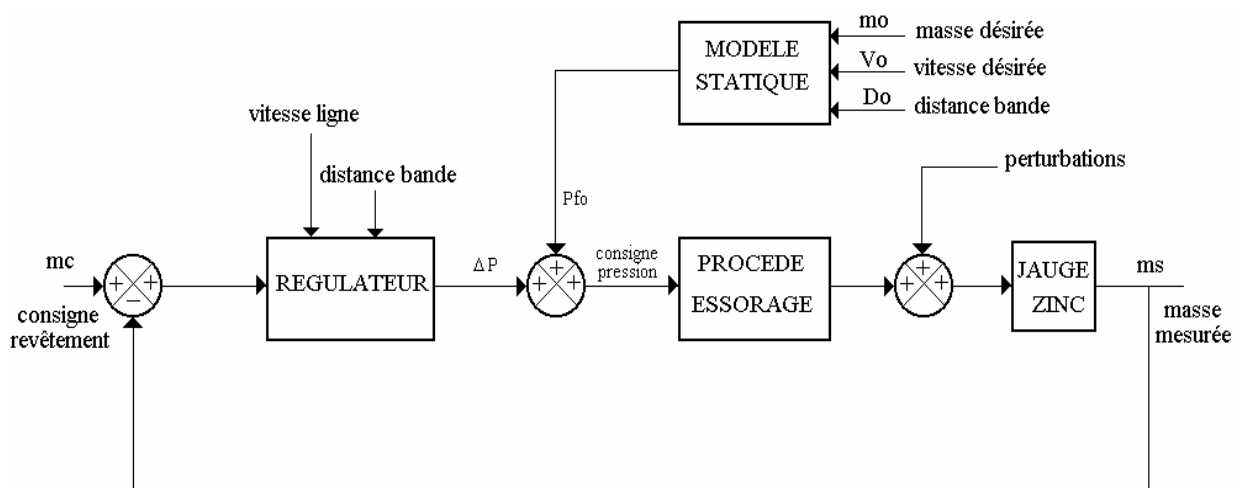


Figure 8

C.2.3 On peut alors considérer pour ce procédé un modèle dynamique reliant les variations de pression aux variations de masse de zinc déposée sous la forme :

$$H_{(p)} = \frac{G \cdot e^{-\psi \cdot p}}{(1 + T \cdot p)} \text{ avec } G = -0,42 \text{ et } T = 9,7 \text{ s}$$

Le régulateur est, pour l'instant, un simple correcteur « proportionnel intégral » ($C_{(p)} = K_p(1 + 1/T_i p)$) avec $T_i = 27,13$ s). **Justifier** le signe de G. En prenant provisoirement pour K_p une valeur égale à -1, **tracer** dans le plan de Black (Document Réponse C) la courbe de réponse en boucle ouverte du système ainsi corrigé. **En déduire** le facteur de résonance en boucle fermée.

C.2.4 De façon à limiter le dépassement lors d'un changement de consigne, on se fixe une marge de phase de 58 degrés. **Déterminer** la valeur finale à donner à K_p .

C.2.5 Une étude plus poussée montre que le correcteur précédent ne permet pas de rejeter de manière satisfaisante les perturbations. Il en résulte en effet des éloignements importants de la variable de sortie par rapport à la valeur désirée. Dans une telle situation une correction par action anticipatrice est nettement supérieure. Le schéma général relatif à la régulation d'épaisseur, munie d'un correcteur à compensation de retard, est alors le suivant :

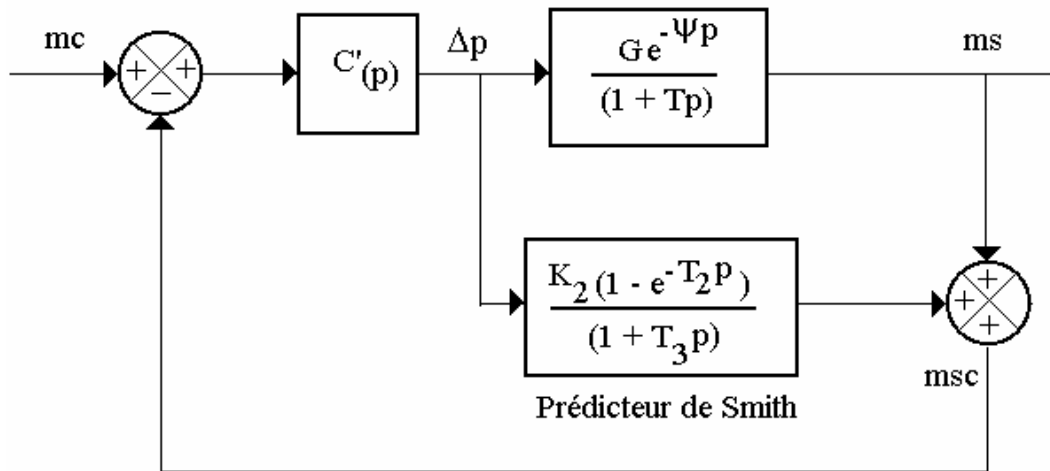


Figure 9

Calculer la transmittance $F_{(p)} = m_{sc(p)} / \Delta p_{(p)}$, **en déduire** la valeur à donner à K_2 , T_2 et T_3 pour que $F_{(p)}$ soit égale à un premier ordre (compensation du temps mort). Le correcteur $C'_{(p)}$ est de type PI, **proposer** une méthode de réglage.

C.2.6 Sachant que ψ varie, **proposer** une solution permettant la réalisation du prédicteur de Smith.

C.2.7 **Identifier** les paramètres qui peuvent dégrader la robustesse du dispositif de régulation.

C.3 Régulation d'épaisseur à l'aide d'un régulateur numérique RST

La solution réelle retenue fait appel à un régulateur numérique muni d'un correcteur RST implanté dans un micro-ordinateur (PC Essorage). Le synoptique général est donné à l'annexe 10. Le modèle continu du procédé est toujours caractérisé par la fonction de transfert donné en C.2.3, toutefois un retard supplémentaire constant (δ) est à considérer. Il est lié au délai nécessaire à la transmission par le réseau informatique d'une nouvelle consigne et sa prise en compte par l'automate programmable qui assure la boucle interne de pression.

C.3.1 On pose $\psi = d.T_e + J$ où d est un nombre entier, T_e la période d'échantillonnage, J le retard fractionnaire ($J < T_e$). A l'aide de la table fournie à l'annexe 11, **montrer** que la fonction de transfert du modèle échantillonné (en présence d'un bloqueur d'ordre zéro) peut se mettre sous la forme suivante :

$$H_{(z-1)} = \frac{z^{-d-1}(b_1 + b_2 z^{-1})}{1 + a_1 z^{-1}}$$

C.3.2 On souhaite obtenir une fonction de transfert de complexité constante telle que :

$$H_{(z-1)} = \frac{z^{-d-1}b_1}{1 + a_1 z^{-1}}$$

Donner la valeur de J satisfaisant cette condition. **En déduire** une conséquence importante pour le choix de T_e lorsque la vitesse de la bande varie.

C.3.3 **Etablir** l'expression de T_e en fonction de L , V , δ , et de d . **Donner** sa valeur avec $d = 7$, $\delta = 3,5$ s, $V = 60$ m.min⁻¹. **Expliquer** la solution qui a été retenue.

C.3.4 Un relevé expérimental donne $G = -0,415$ **en déduire** les coefficients a_1 et b_1 .

C.3.5 **Indiquer** une méthode permettant la détermination des coefficients du correcteur, **justifier** la présence d'une table pour le correcteur RST.

D – PROCÉDE D'ESSORAGE : EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE

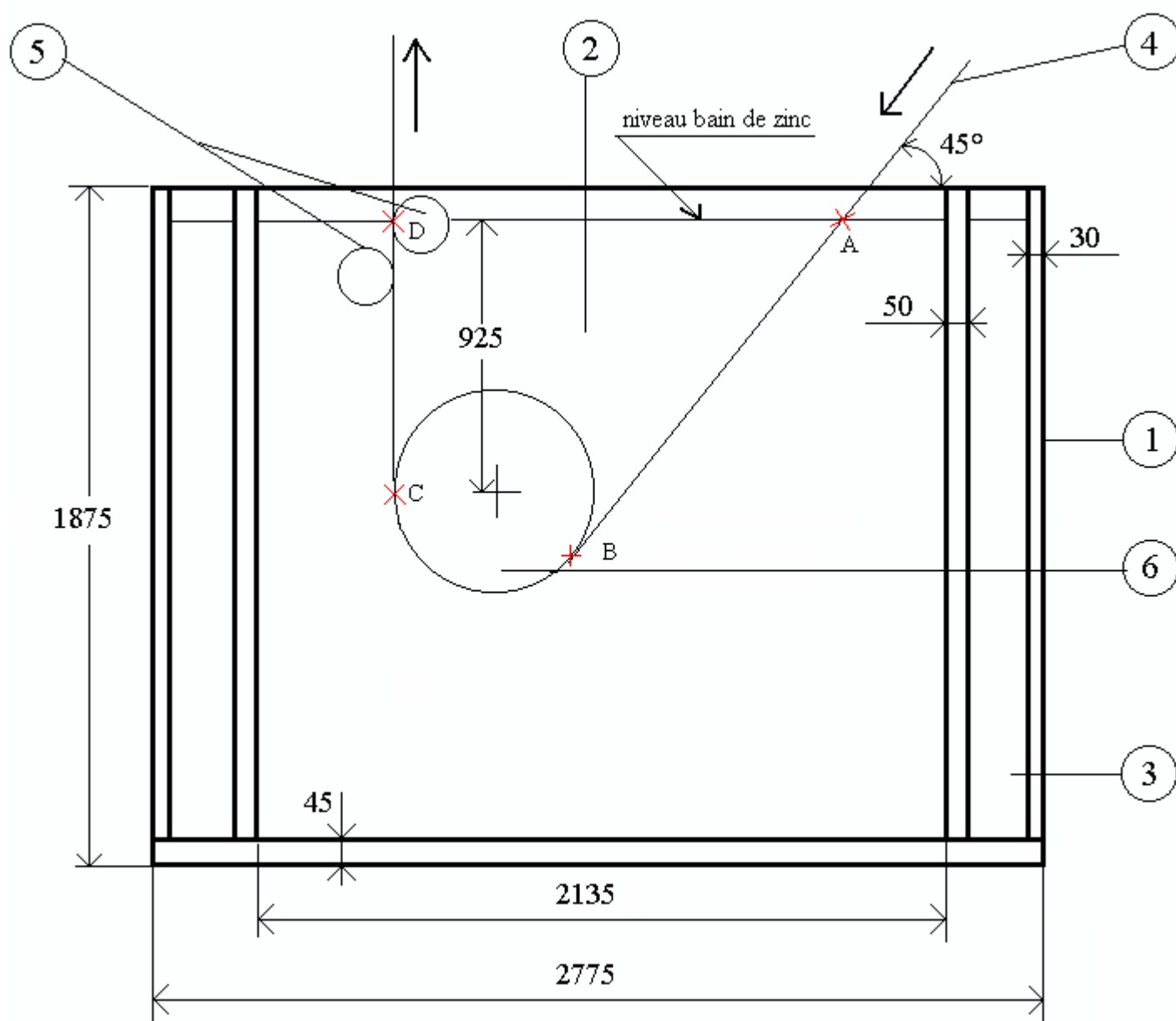
Pour certaines conditions de fonctionnement (V_o et D_o proches des valeurs maximales) la correction de pression Δp issue du correcteur RST est mise à zéro, seule la boucle interne de pression est donc active (cf. figure 8). On se limite à cette partie pour développer un thème en classe de BTS Electro-technique dans le cadre du module « Essais de système ».

D.1 A l'aide d'un croquis, **définir** l'architecture matérielle minimale permettant de reproduire partiellement le fonctionnement de la boucle interne de pression.

D.2 **Donner** les indications nécessaires aux choix technologiques des constituants.

D.3 Dans l'hypothèse où un tel banc d'essai serait disponible, **définir** en quelques lignes les activités pouvant être conduites avec les élèves concernés (objectifs, capacités, contenus associés, critères d'évaluation...).

ANNEXE 1



Cotes en mm – Echelle non contractuelle

- ① Cuve (masse à vide 11,5 tonnes – L x l x h : 2 900 x 2 775 x 1 875 mm)
- ② Bain liquide de zinc (50 tonnes)
- ③ Bain liquide de plomb (50 tonnes)
- ④ Tôle à galvaniser
- ⑤ Rouleaux décambreur
- ⑥ Rouleaux de guidage (diamètre 650 mm – longueur 1 750 mm)

ANNEXE 2

Caractéristiques thermo physiques à $\theta_0 = 20\text{ °C}$ (sauf indications contraires)

Zinc et Plomb

	Zinc	Plomb	Unité
Symbole	Zn *	Pb *	-
Masse volumique (ω)	7 144	11 373	kg,m^{-3}
Température de fusion (θ_{fu})	419,6	327,42	°C
Chaleur latente de fusion (L_{fu})	113	23,2	kJ,kg^{-1}
Température d'ébullition (θ_{eb})	909	1 740	°C
Chaleur latente d'évaporation (L_{ev})	1 762	858	kJ,kg^{-1}
Conductivité thermique (λ)	112,2	35	$\text{W,m}^{-1},\text{°C}^{-1}$
Chaleur massique (état solide) (C)	384,3	130	$\text{J,°C}^{-1},\text{kg}^{-1}$
Chaleur massique moyenne de θ_0 à θ_{fu} (C_m)	421	136	$\text{J,°C}^{-1},\text{kg}^{-1}$
Chaleur massique à 454°C (C')	498	155	$\text{J,°C}^{-1},\text{kg}^{-1}$
Diffusivité thermique (a)	$4,08 \times 10^{-5}$	$8,79 \times 10^{-5}$	$\text{m}^2, \text{s}^{-1}$

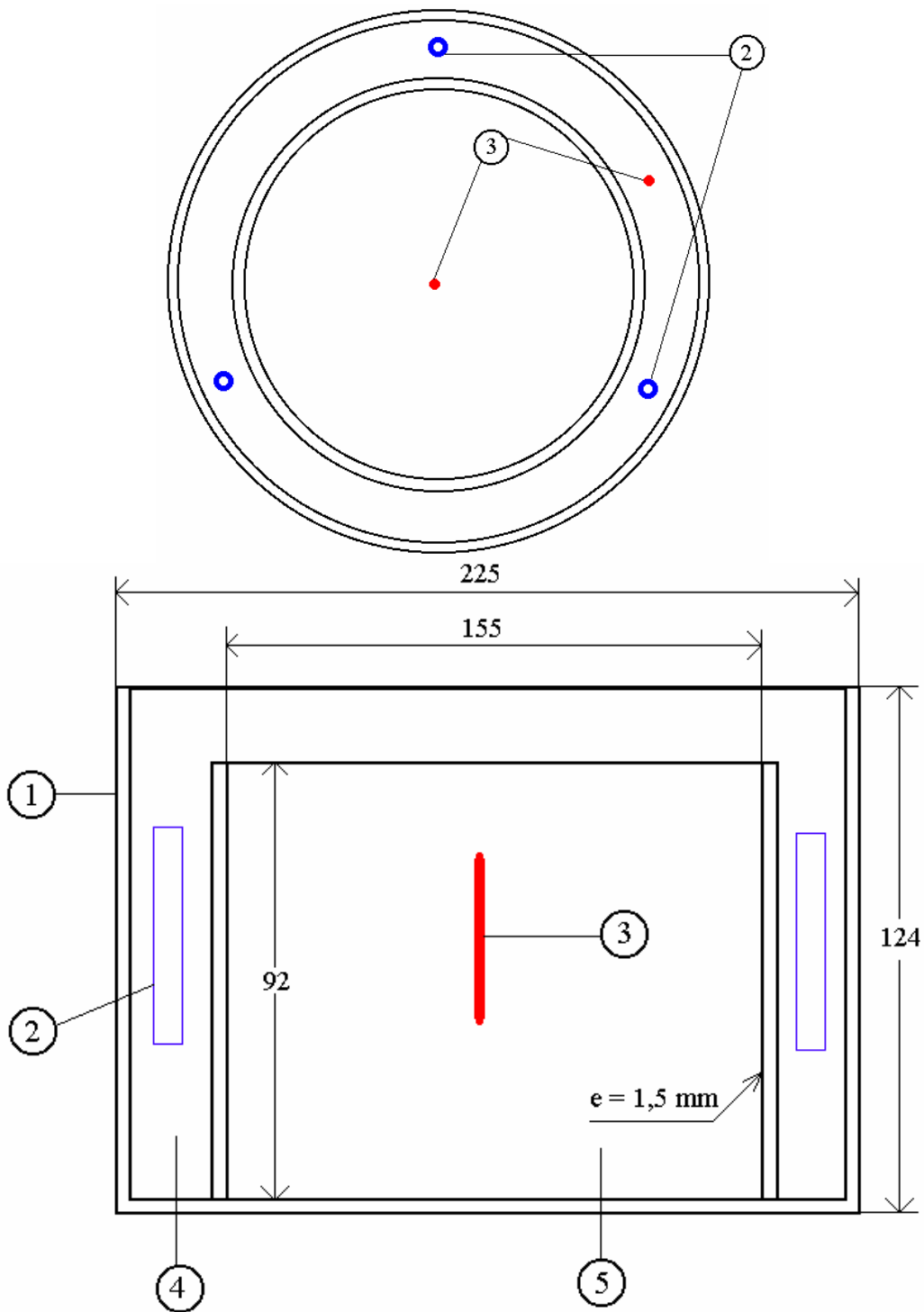
*** Nota bene :** Les grandeurs physiques seront affectées d'un indice « z » pour le zinc, « p » pour le plomb,

ANNEXE 3

Fonction d'erreur erf (u)

u	erf (u)	u	erf (u)	u	erf (u)
0,00	0,00000	0,76	0,71754	1,52	0,96841
0,02	0,02256	0,78	0,73001	1,54	0,97059
0,04	0,04511	0,80	0,74210	1,56	0,97263
0,06	0,06762	0,82	0,75381	1,58	0,97455
0,08	0,09008	0,84	0,76514	1,60	0,97636
0,10	0,11246	0,86	0,77610	1,62	0,97804
0,12	0,13476	0,88	0,78669	1,64	0,97962
0,14	0,15695	0,90	0,79691	1,66	0,98110
0,16	0,17901	0,92	0,80677	1,68	0,98249
0,18	0,20094	0,94	0,81627	1,70	0,98379
0,20	0,22270	0,96	0,82542	1,72	0,98500
0,22	0,24430	0,98	0,83423	1,74	0,98613
0,24	0,26570	1,00	0,84270	1,76	0,98719
0,26	0,28690	1,02	0,85084	1,78	0,98817
0,28	0,30788	1,04	0,85865	1,80	0,98909
0,30	0,32863	1,06	0,86614	1,82	0,98994
0,32	0,34913	1,08	0,87333	1,84	0,99074
0,34	0,36936	1,10	0,88020	1,86	0,99147
0,36	0,38933	1,12	0,88679	1,88	0,99216
0,38	0,40901	1,14	0,89308	1,90	0,99279
0,40	0,42839	1,16	0,89910	1,92	0,99338
0,42	0,44749	1,18	0,90484	1,94	0,99392
0,44	0,46622	1,20	0,91031	1,96	0,99443
0,46	0,48466	1,22	0,91553	1,98	0,99489
0,48	0,50275	1,24	0,92050	2,00	0,995322
0,50	0,52050	1,26	0,92524	2,10	0,997020
0,42	0,53790	1,28	0,92973	2,20	0,998137
0,54	0,55494	1,30	0,93401	2,30	0,998857
0,56	0,57162	1,32	0,93806	2,40	0,999311
0,58	0,58792	1,34	0,94191	2,50	0,999593
0,60	0,60386	1,36	0,94556	2,60	0,999764
0,62	0,61941	1,38	0,94902	2,70	0,999866
0,64	0,63459	1,40	0,95228	2,80	0,999925
0,66	0,64938	1,42	0,95538	2,90	0,999959
0,68	0,66278	1,40	0,95830	3,00	0,999978
0,70	0,67780	1,46	0,96105	3,20	0,999994
0,72	0,69143	1,48	0,96365	3,40	0,999998
0,74	0,70468	1,50	0,96610	3,60	1,000000

ANNEXE 4



Cotes en mm (Echelle non respectée)

- ① Cuve acier inoxydable (masse 2,3 kg, $\lambda_a = 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $C_a = 500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $\omega_a = 7\,800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- ② Thermoplongeurs (3 x 300 W - 230 V)
- ③ Thermocouples
- ④ Bain huile ($\lambda_h = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $C_h = 2\,200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $\omega_h = 860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- ⑤ Bain eau ($\lambda_e = 0,651 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $C_e = 4\,191 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $\omega_e = 983 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à 60°C)

ANNEXE 5

Caractéristiques techniques

	SYSTEME REEL	SYSTEME DIDACTIQUE
matières d'œuvre entrantes	tôle nue et décapée, plomb, zinc (lingots, neufs)	huile, eau
matières d'œuvre sortantes	tôle recouverte de zinc (épaisseur de 7 à 15 μm)	néant
températures mises en jeu	$\theta_{\text{plomb}} = 470^\circ\text{C}$, $\theta_{\text{zinc}} = 460^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{huile}} = 65^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{eau}} = 60^\circ$ (liquide ou glace)
masses des produits	$M_p = 50 \text{ t}$, $M_z = 50 \text{ t}$ $M'_z = 2 \text{ t}$ (lingot neuf)	$M_h = 1,4 \text{ kg}$, $M_e = 1,5 \text{ kg}$
vitesse de défilement de la bande	$45 \text{ m, min}^{-1} < V < 90 \text{ m, min}^{-1}$	Néant
matériaux cuve	acier + tôle inox	acier inoxydable
isolation cuve	béton vermiculite, béton, sable	polystyrène extrudé, fibres céramiques
puissance installation	360 kW (triphase – 220 V)	3 x 300 W (thermoplongeurs)
régulateur	Shinko HCD 130	idem
modulateur	gradateur à ondes pleines (Gradipack)	idem
modèle thermique	1 ^{er} ordre dominant (avec non linéarités et retard pur négligeable)	1 ^{er} ordre dominant (avec non linéarités)
constante de temps thermique	$1,2 \times 10^5 \text{ s}$	à définir
capteur température	thermocouple type K (Nickel/Nickel allié)	à définir
mode de conduite	semi-automatique (préfusion) automatique (avec supervision)	à définir

ANNEXE 6

CAPTEURS DE TEMPERATURE

Thermocouples

Type	Diamètre de la gaine	Configuration nombre de fils	Longueurs de gaine	Gamme de température	Temps de réponse à 63,2% *
TYPE 12 – M Thermocouple gaine métallique déformable, isolation minérale, couple K ou T	0,25 mm 0,5 mm	Soudure chaude isolée (I) ou à la masse (G)	150 mm 250 mm 500 mm 1 m	0°C à 1 100°C (Type K) - 185° C à +300°C (Type T)	15 ms (Ø 0,25 soudure isolée) 30 ms (Ø 0,5 soudure isolée)
TYPE 13 Canne pyrométrique à protecteur métallique	12,7 mm 15,9 mm 21,3 mm 26,7 mm	avec tête de raccordement et raccord soudé (optionnel)	500 mm	K (0 à 1 100 °C) T (-185 à 300 °C) J (+20 à 700 °C) N (0 à 1 150 °C) E (0 à 800 °C) R (0 à 1 600 °C) S (0 à 1 550 °C) B (100 à 1 600 °C) C (50 à 1 820 °C) D (20 à 2 320 °C)	9 s (gaine Ø 12,7mm)

* mesurée pour un passage air à 20 °C / eau à 100 °C

SHINKO

Régulateurs de précision

Les régulateurs de process série HCD 100 sont destinés aux applications industrielles nécessitant précision et vitesse de réaction. La série HCD apporte des fonctions généralement intégrées aux régulateurs de prix élevé telles que la régulation cascade, la configuration par carte mémoire.

- Précision : 0,1% de l'échelle
- Vitesse d'échantillonnage : 0,1 seconde
- Double affichage numérique 100.000 points
- Affichage de textes sur 2 lignes de 16 caractères + bargraph avec réglage de la luminosité
- Entrée et échelle entièrement programmables
- Résolution 0,1°C en température
- Rampes de montée et descente

Entrée programmable

- Thermocouple
K, J, R, S, PL II, B, E, T, W / Re 5.26, N
Choix de la sécurité en cas de rupture capteur (haut ou bas d'échelle)
Voyant d'indication de rupture capteur
- Sonde à résistance
Platine 100 Ω à °C montage 3 fils
- Courant continu
0.20 mA et 4.20 mA
impédance 250 Ω
- Tension continue
0.10 mV, 0.100 mV, 0.1 V, 0.10 V,
1.5 V, ± 10 mV, ± 1 V
- Echelle configurable au clavier
- Limites haute et basse de l'entrée
- Extraction racine carrée
- Décalage de la mesure (± 10% échelle)
- Filtre d'entrée (0 à 100,0 sec)

Sortie

- Sortie en régulation discontinue sur relais 220 V 3A sur charge résistive, 1 A sur charge inductive
- Sortie en régulation discontinue sur niveau logique : 15 V, charge de 250 à 1200 Ohms, 20 mA maxi, protégée contre les court-circuits
- Sortie en régulation continue sur courant 4.20 mA; sortie isolée, charge maxi 600 Ohms, résolution 1/10000
- Limites haute et basse de la sortie (analogique ou discontinue)
- Rafraîchissement de la sortie : de 0,1 à 100% /sec
- Cadence du cycle de modulation : de 1 à 120 sec
- Filtre de sortie : de 0 à 100,0 sec

- Extraction de racine carrée
- Régulation PID + auto réglage avec anti dépassement
- 1 point de consigne + 2 alarmes en standard
- Mémoire de 15 points de consigne sélectionnables à distance ou au clavier
- Mise en route différée par horloge interne
- Garantie 2 ans

Options :

- Sortie analogique 4.20 mA ou 0.1 V pour retransmission mesure (PV), consigne (SV), sortie (MV)
- Consigne analogique externe courant : 0.20/4.20 mA ou tension 0.1/0.10/1.5 V
- Télécommande des fichiers de consigne
Les 15 fichiers de consigne peuvent être sélectionnés à distance sur le bornier du régulateur
La fonction Local/Distance peut également être commandée par cette option
- Etats du régulateur
3 sorties sur collecteur ouvert de l'état du régulateur : rupture capteur; commande en local ou à distance et fonction Auto/Manu
- Communication numérique RS 232C ou RS 485
Cette liaison numérique permet la configuration complète de l'appareil et la lecture des différents états, Protocole Shinko compatible avec logiciels de supervision comme Wizcon
- Lecteur de carte mémoire
Sauvegarde des fichiers, soit pour une raison de sécurité en cas de problème, soit pour implanter ces différentes valeurs dans un autre régulateur
- Fonction cascade
Mise en service d'un deuxième régulateur appelé esclave, celui ci possède son entrée (à définir) qui peut être différente de celle du régulateur dit Maître.
L'option de consigne externe ne peut être installée avec l'option cascade CC.



Options:

- 2 alarmes supplémentaires
- Régulation cascade
- Lecteur de carte mémoire
- Communication numérique RS 485 ou RS 232
- Sortie analogique de recopie mesure
- Consigne analogique externe
- Etats logiques de rupture capteur et Auto / Manu

Mode de régulation

Régulation en mode PID avec Auto réglage (Auto tuning)

- Bande proportionnelle : réglable de 0,1 à 999,9%
- Action intégrale : réglable de 1 à 9999 sec
- Action dérivée : réglable de 1 à 9999 sec
- Décalage de la bande proportionnelle
- Anti dépassement de consigne ARW : réglable de 0 à 100,0%

En fonction Auto réglage (calcul des actions PID + ARW), possibilité de configurer une valeur de décalage empêchant le dépassement du point de consigne.

- Rampes de montée et descente configurables indépendamment

Fonction Auto/Manu

Passage sans à coups du mode manuel au mode automatique et inversement
Réglage de la valeur de sortie avec affichage en %

Mémoire de 15 fichiers de consigne

Chaque fichier peut contenir 13 informations : point de consigne, valeurs PID et ARW, alarmes...
Celui ci peut être appelé manuellement en face avant ou à distance par télécommande sur le bornier arrière (option).
Ces fichiers peuvent être stockés sur carte mémoire par mesure de sécurité ou télécharger sur un autre régulateur.
Exemples d'applications : télécommande par automate du point de consigne suivant procédé en cours, changement de point de consigne à une heure donnée (fonctionnement en veille jour/nuit), consigne de repli en cas d'alarme...

ANNEXE 8 (page 1/2)

Extrait du référentiel BAC STI Spécialité « Génie Electrotechnique » B2 – Electrotechnique

I. OBJECTIFS DU PROGRAMME

II. CONTENUS DE FORMATION, METHODOLOGIE, III. COMPETENCES ATTENDUES

Plan général de l'étude des systèmes de conversion de l'énergie électrique

2, Systèmes terminaux de conversion de l'énergie électrique

2,1 Etude globale du système

- 2.1.1 Nature des systèmes étudiés
- 2.1.2 Aspects méthodologiques pour l'étude des systèmes
 - 2.1.2.1 Approche fonctionnelle
 - 2.1.2.2 Approche matérielle
 - 2.1.2.3 Approche séquentielle et temporelle des tâches qui caractérisent le processus du système

2, Systèmes terminaux de conversion de l'énergie électrique

2,1 Etude globale du système

2.1.1 Nature des systèmes étudiés

Les systèmes automatisés étudiés devront comporter un système de conversion d'énergie, agissant sur les processeurs, au service d'un procédé choisi dans l'un des domaines suivants :

- l'électrothermie ;
 - l'électrochimie ;
 - l'éclairage ;
 - la force motrice,
- où la conversion d'énergie prend une place prépondérante,

L'enseignement des systèmes à dominante électrotechnique doit éviter les études théoriques qui ne seraient pas en relation avec le concret, et où les modélisations ne seraient pas confrontées aux phénomènes physiques mesurés sur le système réel dans son contexte dynamique,

Dans le cas où l'on ne disposerait pas du système physique, on aura recours à des dossiers d'exemples industriels effectivement réalisés, ou des dispositifs de simulation industriels,

2.1.2 – Aspects méthodologiques pour l'étude des systèmes

Le système automatisé sera appréhendé selon trois approches complémentaires :

- approche fonctionnelle (modélisation des activités du système) ;
- approche matérielle (mise en œuvre du système et représentation symbolique de ses constituants) ;
- approche séquentielle (modélisation de l'évolution temporelle de l'activité du système),

2.1.3 - Compétences attendues

En présence d'un système automatisé, les schémas, le programme (ou le type de commande) et la documentation technique étant fournies :

- a. justifier une décomposition fonctionnelle du système automatisé selon la méthode d'analyse descendante (point de vue gestion d'énergie) ;
- b. définir, sur la décomposition matérielle, la frontière des fonctions et repérer les contrôles énergétiques ou informationnels de chacune d'elles ;
- c. désigner, justifier, choisir, mettre en œuvre les constituants qui réalisent la synthèse des fonctions ;

ANNEXE 8 (page 2/2)

- d. valider les propriétés définies par les modélisations du système automatisé au moyen de dispositions de mesures et essais ;
- e. proposer une modélisation du sous-système de gestion d'énergie et valider cette modélisation au moyen d'essais et de mesurages conduits sur le système automatisé ;
- f. montrer que la performance du système est limitée par la mise en œuvre du sous-système le moins performant ;
- g. caractériser la commande du système et les sous-systèmes de traitement et d'acquisition des données ;
- h. désigner les relations qui permettent des rétroactions (régulations ou asservissements) ;
- i. régler le gain de la chaîne d'actions et ajuster les correcteurs associés, à l'aide de mesurages ou d'observations, afin d'obtenir le comportement attendu du système automatisé ;
- j. identifier les contraintes de stabilité du système automatisé ;
- k. modifier l'enchaînement des tâches pour satisfaire une autre configuration du processus de réalisation ;
- l. montrer que les moyens techniques qui réalisent les fonctions évoluent très rapidement dans le temps, que l'architecture fonctionnelle est en général plus stable et que les données ou contraintes d'activités constituent les entités les plus constantes dans l'évolution des systèmes.

2.2.3.5 – Fonction commander la puissance

2.2.3.5.2 – Par ondulation d'énergie (régler, asservir, réguler)

- *Caractérisation de la modulation ou de la variation*
 - Caractères de la charge à contrôler – Etats de la charge (vitesse, température, luminosité) :
- Maintenir un état constant
- Asservir un état à une variable,
- *Grandeurs physiques associés*
 - Température,
- *Convertisseurs statiques*
 - Gradateurs
 - Cartes optionnelles pour convertisseurs,
 - Capteurs associés à la boucle de retour,
 - Dispositifs de sécurité associés,
 - Dispositifs de dialogue/communication associés à la commande numérique),,
 - Réseaux correcteurs,
- *Compétences attendues*
(Voir Fonction convertir l'énergie),

2.2.3.6 – Fonction convertir l'énergie

- *Caractérisation de la conversion d'énergie*
 - Type de conversion : énergie électrique/énergie thermique
- *Récepteurs Actionneurs*
 - Radiateurs et fours industriels
- *Compétences attendues*
En présence d'un système de conversion d'énergie, le dossier technique étant fourni ;
 - justifier le choix du convertisseur d'énergie ;
 - justifier le choix du modulateur (variateur, démarreur, gradateur) associé au convertisseur d'énergie ;
 - configurer le modulateur (mettre en œuvre des éléments optionnels disponibles) ;
 - effectuer les réglages externes du modulateur ;
 - analyser le circuit de puissance du modulateur et tester son bon fonctionnement ;
 - vérifier, à l'aide de mesurages pertinents, les performances attendues du système de conversion,
-

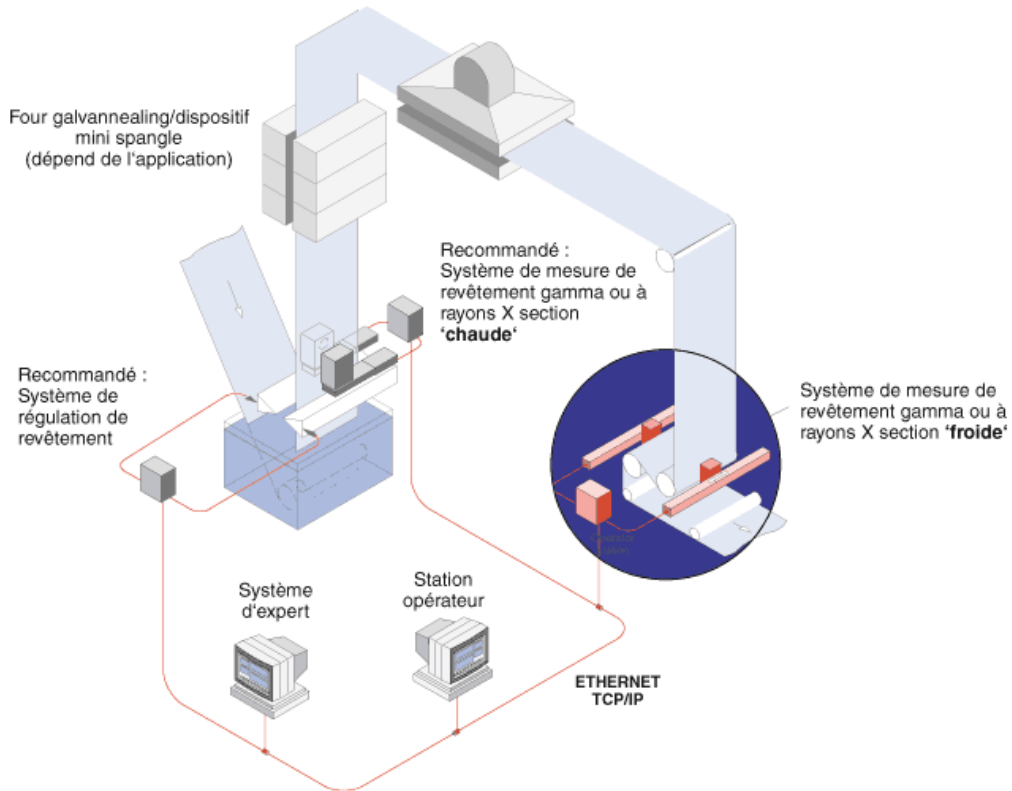
ANNEXE 9

Principes de régulation (jauge chaude ou jauge froide)

(source, site : www.radiometrie.com)

(13)-B1

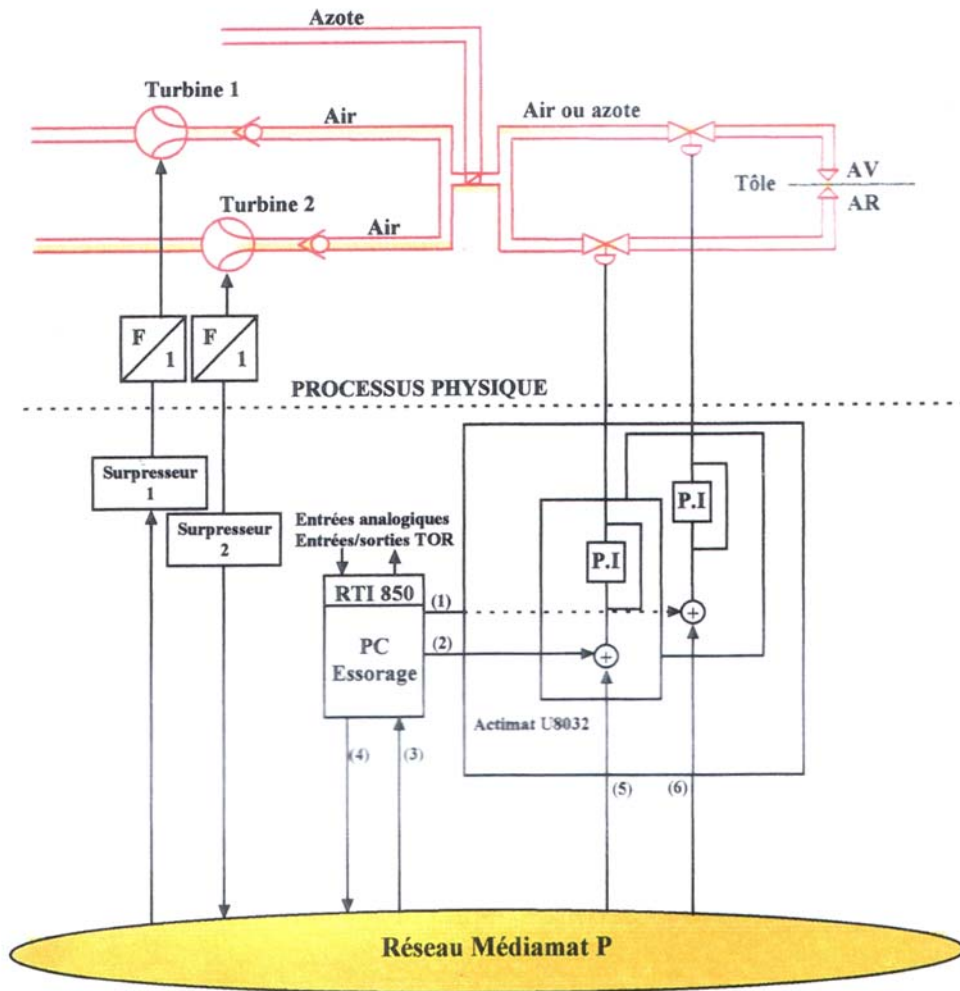
Système de mesure de revêtement section 'froide'



Chargement d'un lingot
(Revue « Galva » - Sollac-Atlantique)

ANNEXE 10

Architecture matérielle de la régulation d'épaisseur



- (1) Correction AR,
- (2) Correction AV,
- (3) Consigne poids de zinc et position buse,
- (4) Mesure poids de zinc
- (5) Consigne pression AV,
- (6) Consigne pression AR.

ANNEXE 11

Schéma général de la régulation numérique

(Source : « Identification et régulation des systèmes » par I. D. Landau)

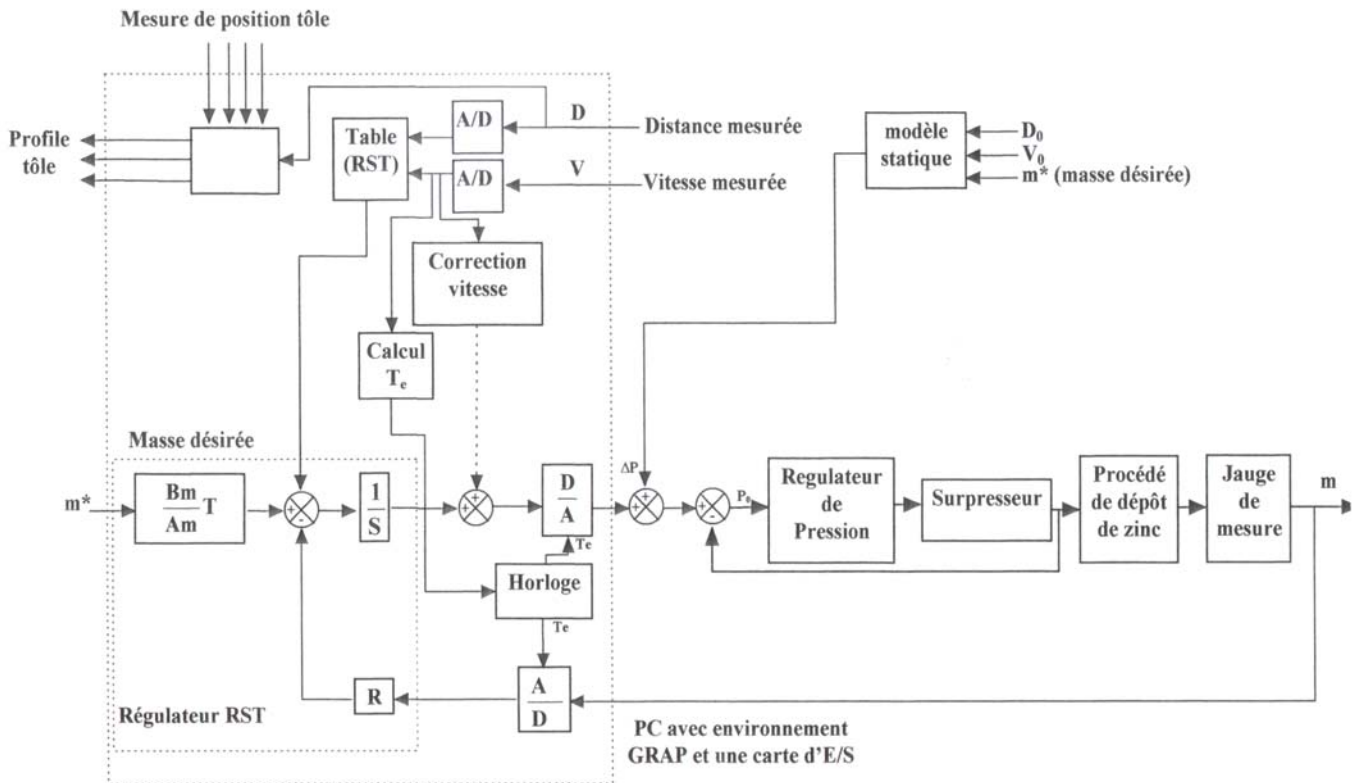


Table de transformées pour procédés avec bloqueur d'ordre zéro

(D'après Ioan Doré Landau « Identification et commande des systèmes »)

$H(p)$	$H(z^{-1})$
$\frac{1}{p}$	$\frac{T_e z^{-1}}{1 - z^{-1}}$
$\frac{G}{1 + pT}$	$\frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad b_1 = G(1 - e^{-T_e/T}) \quad a_1 = -e^{-T_e/T}$
$\frac{Ge^{-pL}}{1 + pT}$ $L < T_e$	$\frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad a_1 = -e^{-T_e/T}$ $b_1 = G(1 - e^{-(L-T_e)/T}) \quad b_2 = Ge^{-T_e/T} (e^{L/T} - 1)$

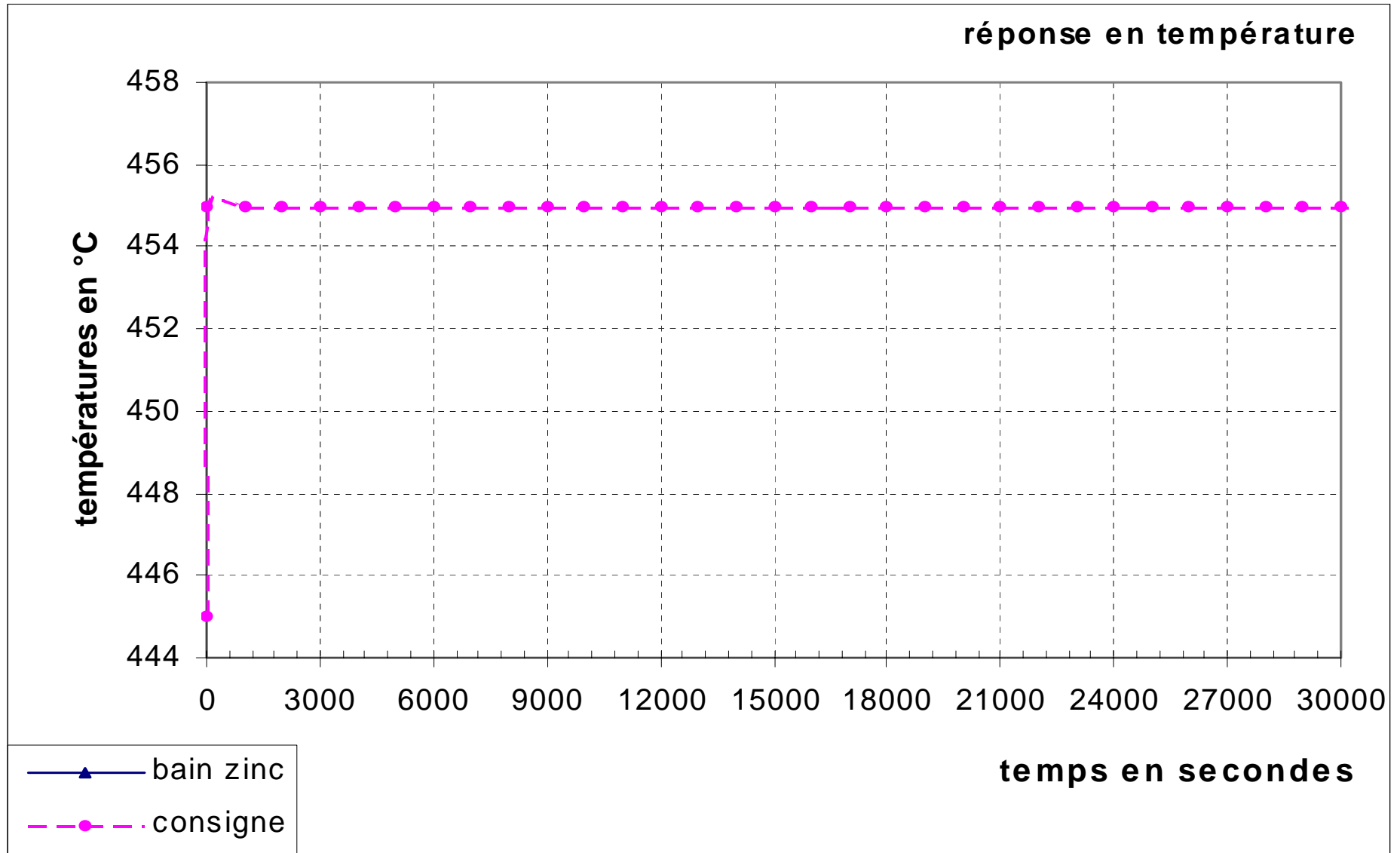
Document Réponse A-1

	Surface en m ²	Température en °C	Pertes par convection en W	Emissivité	Pertes par rayonnement en W	Pertes totales en W	Résistance thermique en °C/W
Cuve acier (rebords, extérieurs, goulotte...	1,29	465		0,6			$R_{dae} =$
Plomb	1,9	470		0,35			$R_{dp} =$
Cuve acier (rebords intérieurs, renforts....)	0,923	465		0,6			$R_{dai} =$
Zinc	5,98	460		0,3			$R_{dz} =$

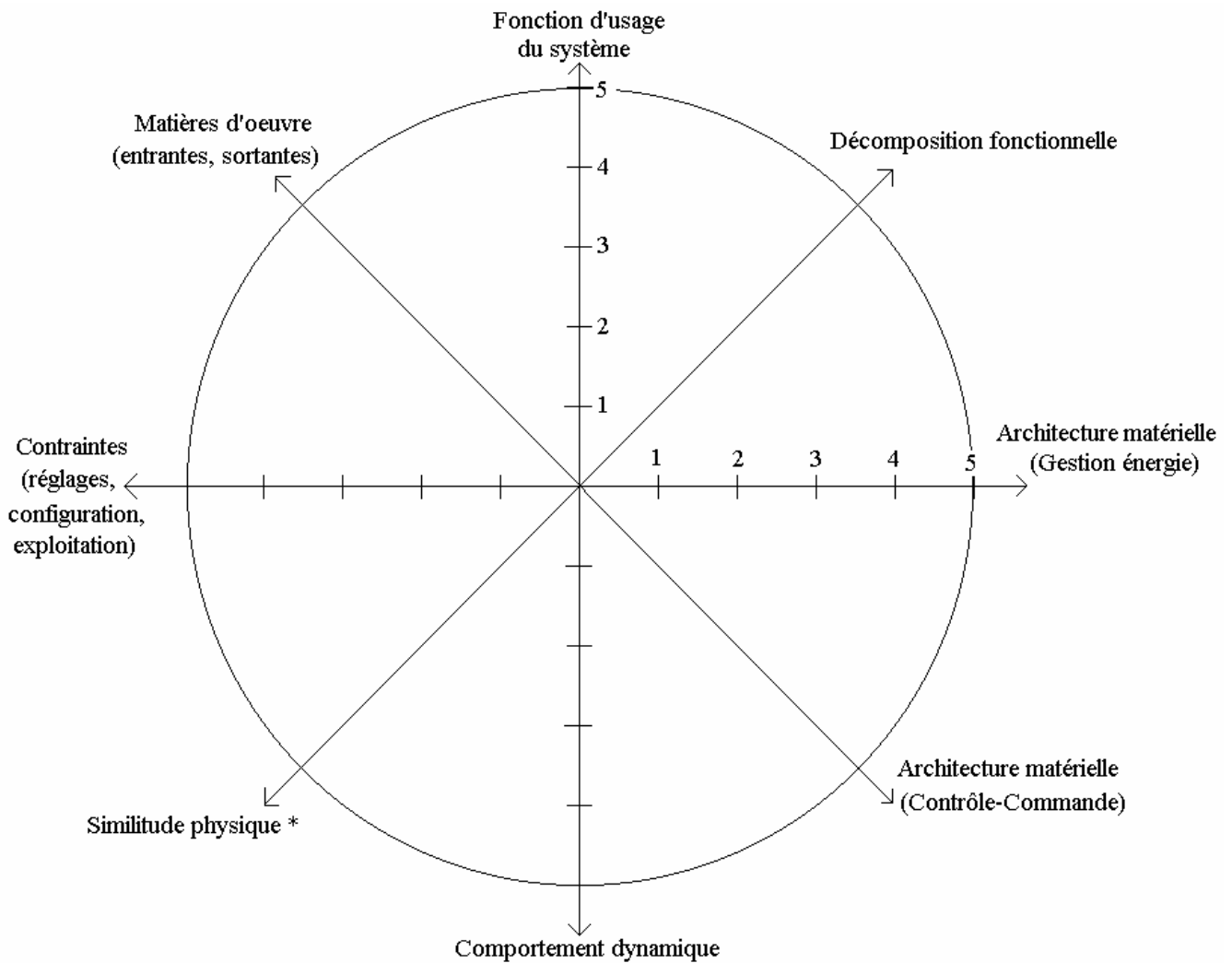
Document Réponse A-2

	Masse volumique en kg.m⁻³	Masse en kg	Chaleur massique (à 460 °C) en J.kg⁻¹.°C⁻¹	Capacité thermique en kJ.°C⁻¹
Cuve	7 800	11 463	675	
Renforts IPN + goussets + goulotte	7 800	1 283	675	
Rouleaux de guidage	7 800	2 600	580	
Zinc	6 904 (à 454°C)	50 000	498	
Plomb	10 444 (à 454°C)	50 000	155	
TOTAL				

Document Réponse A-3



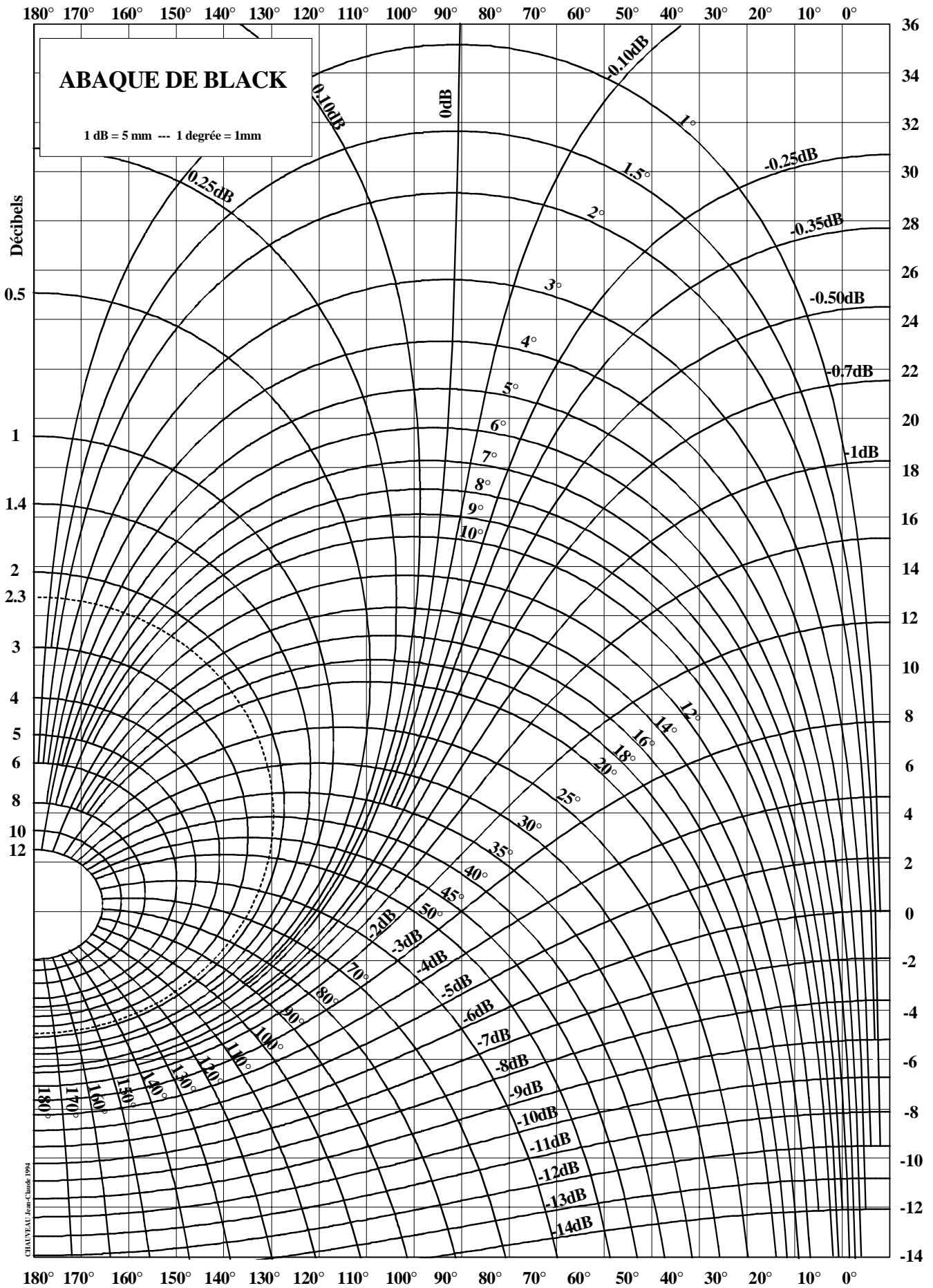
Document Réponse B



* On pourra comparer sur les deux équipements les grandeurs adimensionnelles suivantes :

- rapport inertie thermique cuve/inertie thermique des fluides,
- rapport température fluide caloporteur/température du bain utile
- rapport constante de temps thermique/période de découpage du gradateur
- rapport constante de temps thermique/constante de temps des sondes de température...

Document réponse C



(source : « Systèmes asservis linéaires » J-C et P CHAUVEAU – Ed. GARNIER, 1974)

ELEMENTS DE CORRIGE

ETUDE D'UN PROBLEME D'AUTOMATISATION option B

1^{ère} Partie

Question A-1

A.1.1 Longueur immergée :

$$l_i = AB + BC + CD$$

$$AB = \sqrt{2[925 + \frac{\sqrt{2}}{2}(\frac{650}{2})]} = 1\,633,74 \text{ mm}$$

$$BC = \frac{650}{2} \times \frac{3\pi}{4} = 765,76 \text{ mm}$$

$$CD = 925 \text{ mm d'où } l_i = 3,324 \text{ m}$$

Durée minimale d'immersion :

$$t_i = \frac{l_i}{V_{\max}} = 2,216 \text{ s}$$

Le temps d'immersion est donc toujours suffisant avec les dimensions choisies, d'autre part il faut pouvoir disposer d'une **inertie thermique suffisante** en cas de coupure de courant, donc disposer d'une masse en fusion importante (ici 50 tonnes de zinc et 50 tonnes de plomb).

$$\text{A.1.2 } W_{\text{eZs}} = \int_{\theta}^{\theta_{\text{fuz}}} M_z \cdot C_{\text{zm}} \cdot d\theta$$

Avec $C_{\text{zm}} \rightarrow$ chaleur massique moyenne du zinc

$$W_{\text{eZs}} = M_z C_{\text{zm}} [\theta_{\text{fuz}} - \theta_0]$$

$$\text{A.N. } W_{\text{eZs}} = 1,869 \text{ MWh } (6,729 \times 10^9 \text{ J})$$

$$\text{A.1.3. } W_{\text{fuz}} = M_z \cdot L_{\text{fuz}}$$

$$\text{A.N. } W_{\text{fuz}} = 40 \times 10^3 \times 113 \times 10^3 / 3\,600 = 1,255 \text{ MWh}$$

$$\text{A.1.4 } W_{\text{eZl}} = M_z C_{\text{zl}} [\theta_{\text{zinc}} - \theta_{\text{fuz}}]$$

$$\text{A.N. } W_{\text{eZl}} = 0,2235 \text{ MWh}$$

$$\text{A.1.5. } W_{\text{uz}} = W_{\text{eZs}} + W_{\text{fuz}} + W_{\text{eZl}}$$

$$\text{A.N. } W_{\text{uz}} = 3,3475 \text{ MWh}$$

$$t_{\text{fus}} = \frac{W_{\text{uz}}}{(\eta \cdot P)} \Rightarrow t_{\text{fus}} = 13,28 \text{ heures } (13\text{h}17')$$

A.1.6 (t_{fus}) théorique \ll (t_{fus}) réel \rightarrow car la chaleur ne se diffuse pas instantanément dans le matériau (corps épais donc non « isotherme » cf questions A.3).

Question A.2

$$\text{A.2.1 } \theta_{\text{e}_q} = \theta_{\text{pb}} = \theta_{\text{pa}} = \theta_{\text{rup}} = 327,42^\circ\text{C}$$

$$\text{A.2.2 } \Delta W_{\text{epI}} = M_{\text{pb}} \cdot C_{\text{pbl}} (\theta_{\text{p}} - \theta_{\text{fup}})$$

$$\text{A.N. } \Delta W_{\text{epI}} = 50 \times 10^3 \times 155 \times (470 - 327,42) / 3\,600$$

$$\Delta W_{\text{epI}} = \mathbf{306,94 \text{ kWh}}$$

$$\text{A.2.3 } \Delta W_{\text{pa}} = M_{\text{pa}} \cdot C_{\text{pa}} (\theta_{\text{eq}} - \theta_0)$$

$$\text{A.N. } \Delta W_{\text{pa}} = 9 \times 10^3 \times 575 \times (327,42 - 20) / 3\,600$$

$$\Delta W_{\text{pa}} = \mathbf{441,92 \text{ kWh}}$$

A.2.4 Masse de plomb refroidi :

$$M_{\text{pbr}} = \frac{(\Delta W_{\text{pa}} - \Delta W_{\text{epI}})}{L_{\text{fup}}}$$

$$\text{Masse liquide : } M_{\text{pbl}} = M_{\text{pb}} - M_{\text{pbr}}$$

$$\text{A.N. } M_{\text{pbr}} = 20\,944,6 \text{ kg}$$

$$M_{\text{pbl}} = \mathbf{29\,055,4 \text{ kg}}$$

Conclusion : Une partie du plomb se refroidissant retrouve l'état solide, il faudra d'abord la refondre cette masse (M_{pbr}) avant d'introduire les lingots de zinc.

A.2.5 Il faut à tout prix éviter les chocs thermiques, afin d'assurer une dilatation progressive de la cuve. Dans le cas contraire, les soudures peuvent céder.

Question A.3

$$\text{A.3.1 } F = F_{\varepsilon} \cdot F_{12} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \frac{S_1}{S_2}}$$

$$\text{Avec } F_{12} = 0,88$$

$$S_1 = S_{A1} = 1,83 \times 2,28 = 4,1724 \text{ m}^2$$

$$S_2 = [2 \times 0,9]^2 = 3,24 \text{ m}^2$$

$$\text{A.N. } F = \frac{1}{\frac{1-0,6}{0,6} + \frac{1}{0,88} + \frac{1-0,25}{0,25} \times \frac{4,172}{3,24}} \quad \mathbf{F = 0,1765}$$

$$P_{\text{sz}} = \sigma \cdot F \cdot [(\theta_{\text{acier}} + 273,15)^4 - (\theta_{\text{zinc}} + 273,15)^4]^4$$

$$\text{A.N. } P_{\text{sz}} = 5,6698 \times 10^{-8} \times 0,1765 [(470 + 273,15)^4 - (20 + 273,15)^4] \quad \mathbf{P_{sz} = 2,978 \text{ kW/m}^2}$$

A.3.2 À cette température les échanges par convection (mouvements de l'air à l'intérieur de la cuve) ne sont pas encore négligeables, d'autre part l'émissivité du zinc n'est pas favorable à l'absorption du rayonnement des parois (réflexion importante).

$$\text{A.3.3 } \theta_{(0,t)} = \theta_0 + \frac{2\varphi_0}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}}$$

$$u = \frac{x}{2\sqrt{at}} = 0 \text{ pour } x = 0$$

$$\theta_{(0,t_f)} = \theta_0 + \frac{2\varphi_0}{\lambda} \sqrt{\frac{at_f}{\pi}} = \theta_{\text{fuz}}$$

$$\left[(\theta_{\text{fuz}} - \theta_0) \frac{\lambda}{2\varphi_0} \right]^2 \cdot \frac{\pi}{a} = t_f$$

$$\text{A.N. } t_f = \frac{\pi}{3,5510^{-5}} \left[(419,6 - 20) \frac{105}{2 \times 15 \times 10^3} \right]^2$$

$t_f = 1,731 \times 10^5$ s soit 48 heures environ

$$\text{A.3.4} \quad \theta_{(b,t_f)} = \theta + \frac{2\varphi_0}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{at_f}{\pi}} e^{-u^2} - \frac{b}{2}(1 - \text{erf}(u)) \right]$$

A.N. avec $u = \frac{b}{2\sqrt{a \cdot t_f}} = 0,1816 = 0,18$

D'où $\text{erf}(u) = 0,2$

$$\theta_{(b,t_f)} = 20 + \frac{2 \times 15 \times 10^3}{105} \left[\sqrt{\frac{3,55 \times 10^{-5} \times 1,736 \times 10^5}{\pi}} e^{-(0,2)^2} - 0,45(1 - 0,2) \right]$$

$\theta_{(b,t_f)} = 301,02^\circ \text{C} < \theta_{\text{fuz}} \Rightarrow$ face opposée non fondue.

La fusion n'est pas homogène et le temps de fusion de la surface des lingots est relativement long.

A.3.5 La résistance thermique entre la paroi et le zinc (liquide) va considérablement s'abaisser, aux transferts radiatifs vont succéder les transferts par convection qui sont ici très élevés (h_c de l'ordre de 10^4 à $10^5 \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dans les métaux liquides). La fusion va donc considérablement s'accélérer. En moins de 24 heures l'intégralité des lingots sera fondue.

A.3.6 Aujourd'hui dans les installations modernes (M_z de l'ordre de 200 à 300 tonnes) les cuves sont chauffées par induction. Les inducteurs étant habituellement alimentés en 50 Hz.

Question A.4

A.4.1 $R_{\text{iso}} = \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S_i}$

A.N. $R_{\text{iso}} = \frac{0,25}{0,2 \cdot 16,5} = 0,758^\circ \text{C/W}$

$$[\theta_{\text{pa}} - \theta_0] = P_{\text{ds}} (R_{\text{iso}} + R_{\text{ta}}) \quad \text{d'où : } P_{\text{ds}} = \frac{[\theta_{\text{pa}} - \theta_0]}{R_{\text{iso}} + R_{\text{ta}}}$$

A.N. $P_{\text{ds}} = 3\,091 \text{ W}$

A.4.2 $R_{\text{ai}} = \frac{e_{ai}}{S_{ai} \cdot \lambda_{ao}}$

A.N. $R_{\text{ai}} = \frac{50 \times 10^{-3}}{14,8 \times 35} = 0,0965 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/W}$

R_{ai} est négligeable si $(\theta_p - \theta_z) \approx 0$, quel que soit le régime (transitoire ou stationnaire)

Une condition suffisante est : $R_{\text{ai}} \ll (R_{\text{dai}} // R_{\text{dz}})$ et $R_{\text{ai}} \ll (R_{\text{dae}} // R_{\text{dp}})$

A.4.3 Cf document réponse A-1

$$P_1 \rightarrow = \sigma \cdot S_1 \cdot F [T_1^4 - T_2^4]$$

$$F = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + 1 + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \frac{S_1}{S_2}}$$

Avec $\varepsilon_2 \approx 1$ et $S_1 \ll S_2$ (milieu ambiant)

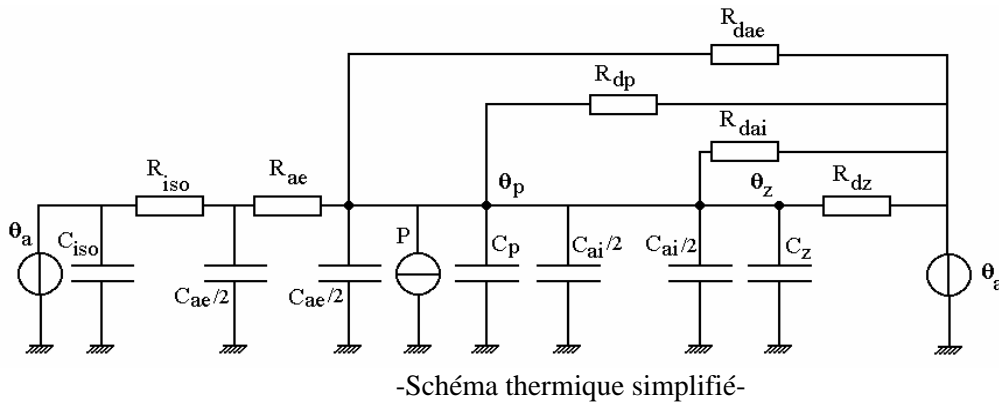
D'où $F \approx \varepsilon_1$

$P_i = \sigma \cdot S_i \cdot \varepsilon_i [(\theta_i + 273,15)^4 - (273,15 + \theta_0)^4]$ avec $(i = p, z, a)$

$$R_{thi} = \frac{\Delta\theta_i}{Pd_i}$$

A.4.4 Cf Document-réponse A-2

A.4.5



D'où le schéma équivalent final proposé (pertes à travers l'isolation négligées) avec :

$$R_{th} = R_{dae} // R_{dp} // R_{dai} // R_{dz} \quad \text{et} \quad C_{th} = C_{ae} + C_p + C_{ai} + C_z$$

$$R_{th} = \frac{\theta_z - \theta_a}{\sum_i P_{di}} \quad \text{et} \quad C_{th} = \sum_j M_j C_j$$

$M_j \rightarrow$ masse de l'élément j

$C_j \rightarrow$ chaleur massique **moyenne** de l'élément j

A.N. $R_{th} = \frac{440}{151070} = 2,913 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/W}$

$C_{th} = 42\,761,56 \text{ kJ/}^\circ\text{C.}$

$\tau = R_{th} \cdot C_{th} = 1,246 \times 10^5 \text{ s}$

A.4.6 \rightarrow la valeur de chaque grandeur ($\lambda_i C_i, M_i \dots$) est connue avec une certaine marge d'erreur (au mieux 5% ...) donc l'erreur globale peut-être de l'ordre de 30 à 40 % ! ...

\rightarrow le modèle n'est pas linéaire ($h_{conv} \rightarrow \Delta\theta^{1/4}, P_{ray} \rightarrow \theta^4$), toute modification du point de repos entraînera une variation des éléments du modèle.

\rightarrow le modèle ne prend pas en compte :

- l'énergie évacuée par la bande recouverte de zinc lorsqu'elle sort du bain ($\Delta W = \Delta m_z \cdot C_z \cdot \theta_z$),
- l'énergie échangée entre la bande et le bain en fusion ($\Delta W = m_b \cdot C_b \cdot [\theta_z - \theta_b]$),
- l'énergie à fournir au lingot qui compense la perte de zinc,
- les variations de température ambiante...

N. B. Si la température de la bande à l'entrée du bain est égale à celle du zinc et si la régulation du niveau de zinc est assurée, ces perturbations sont négligeables (hypothèses peu réalistes ...).

Question A.5

A.5.1 → précision requise de $\pm 2^\circ\text{C}$ (imposée par les métallurgistes au regard des réactions physico-chimiques et stabilité de la viscosité du zinc indispensable pour l'essorage) le tout contribue évidemment à la **qualité du revêtement imposée par les clients**.

A.5.2 **K** : sensibilité du thermocouple + étage d'**amplification** du régulateur

K₀ : « gain statique » du gradateur

K₁ : « gain statique » du procédé ($K_1 = R_{th}$)

τ : constante de temps thermique équivalente du procédé.

A.5.3 $t_c = 1 \text{ s}$ à $2,5 \text{ s}$ en général (ex : *Gradipak*) donc $t_c \ll \tau \rightarrow$ le procédé se comporte donc un filtre passe-bas (ici quasiment comme un intégrateur) vis à vis des variations de puissance générées par le modulateur d'énergie ; le choix est donc parfaitement adapté.

$$\text{A.5.4} \quad H_{BO(p)} = \frac{u_{in}^*}{u_c^*} = \frac{K_o.K_l.K}{1+\tau p} \quad \text{et} \quad H_{BF(p)} = \frac{H_{BO}}{1+H_{BO}}$$

$$H_{BF(p)} = \frac{K_o.K_l.K}{(1+\tau p)(1+\frac{K_o.K_l.K}{1+\tau p})} = \frac{K_o.K_l.K}{(1+\tau p+K_o.K_l.K)} = \frac{K_o.K_l.K}{(1+K_o.K_l.K)(1+\frac{\tau p}{K_o.K_l.K})}$$

$$H_{BF(p)} = \frac{K'}{1+\tau' p} \quad \text{avec} \quad \tau' = \frac{\tau}{(1+K_o.K_l.K)} = 3,89.10^4 \text{ s} \quad \text{et} \quad K' = \frac{K_o.K_l.K}{(1+K_o.K_l.K)} = 0,676$$

A.5.5 Erreur égale à 32,4 %

A.5.6 $K_c = 119,73$

$$\text{A.5.7} \quad H_{BF(p)} = \frac{(1+\frac{1}{T_i p}) \frac{(K_c.K_o.K_l.K)}{(1+\tau p)}}{[1+(1+\frac{1}{T_i p}) \frac{K_c.K_o.K_l.K}{(1+\tau p)}]} = \frac{(1+T_i p) \frac{(K_c.K_o.K_l.K)}{(1+\tau p)T_i p}}{[1+(\frac{1+T_i p}{T_i p}) \frac{K_c.K_o.K_l.K}{(1+\tau p)}]} = \frac{(1+T_i p) \frac{(K_c.K_o.K_l.K)}{T_i p}}{[(1+\tau p)+(\frac{1+T_i p}{T_i p})K_c.K_o.K_l.K]}$$

$$\frac{(1+T_i p)K_c.K_o.K_l.K}{[T_i p(1+\tau p)+((1+T_i p)K_c.K_o.K_l.K)]} = \frac{(1+T_i p)}{(1+T_i p(1+\frac{1}{K_c.K_o.K_l.K})+\frac{\tau T_i p^2}{K_c.K_o.K_l.K})}$$

$$H_{BF(p)} = \frac{(1+\frac{p}{\omega_1})}{(1+\frac{2mp}{\omega}+\frac{p^2}{\omega_0^2})} \quad \text{avec} \quad \omega_1 = \frac{1}{T_i} \approx 10^{-4} \text{ rd/s} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{K_c.K_o.K_l.K}{\tau.T_i}} = 1,961.10^{-4} \text{ rd/s}$$

$$m = \frac{\omega_0.T_i}{2} \cdot (\frac{1}{K_c.K_o.K_l.K} + 1) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_c.K_o.K_l.K.T_i}{\tau}} \cdot (\frac{1}{K_c.K_o.K_l.K} + 1) = 1,0017 \approx 1$$

- Amortissement critique donc pas d'oscillations.
- Avec $T_i = 9\,999 \text{ s}$, valeur maximale permise avec le régulateur numérique choisi (*Shinko*), on ne pourrait donc pas supprimer le pôle dominant $(1 + \tau p)$.

$$\text{A.5.8 } H_{\text{BF}(p)} = \frac{(1+\frac{p}{\omega})}{(1+\frac{p}{\omega_0})^2} \text{ avec un échelon de consigne positif, } \frac{U_c}{p} : U_{\text{m}(p)} = \frac{U_c}{p} \frac{(1+\frac{p}{\omega})}{(1+\frac{p}{\omega_0})^2}$$

$$\tau_0 = \frac{1}{\omega} = 5\,100 \text{ s et } \tau_1 = \frac{1}{\omega_1} = T_i = 9\,999 \text{ s}$$

D'après les tables de transformées il vient :

$$U_{\text{m}(p)} = U_c \cdot \left\{ \left[\frac{(\tau_1 - \tau_0)}{\tau_0^2} t - 1 \right] \times e^{-t/\tau_0} + 1 \right\} \quad \text{d'où} \quad \Delta\theta_{\text{zinc}} = \Delta\theta_c \cdot \left\{ 1 + [188,413 \times 10^{-6} t - 1] \cdot e^{-t/5099,44} \right\}$$

A.5.9 Le tracé de cette fonction est donné en annexe. Le dépassement vaut 1,2 °C, ce qui reste dans la fourchette tolérée ($\pm 2^\circ\text{C}$). Pour des variations de consigne de plus forte valeurs il en serait autrement; ceux-ci sont cependant limités ($445 < \theta_z < 457^\circ\text{C}$). On rappelle d'autre part que la montée initiale en température est toujours progressive. (cf A.2.5).

Le temps de réponse à 5% est de 20 500 s (environ 6 heures).

Dépassement : $\frac{1,24^\circ\text{C}}{10^\circ\text{C}} = 12,4\%$ sur certains régulateurs la fonction ARW permet d'éviter le dépassement de la consigne due à l'effet de l'action intégrale.

PARTIE B – EXPLOITATION PEDAGOGIQUE

Question B.1 Transposition didactique

B.1.1 Points pouvant être abordés :

- changement d'état solide /liquide
- transfert de chaleur (conduction/convection/rayonnement)
- chauffage indirect par convection/conduction (\rightarrow chauffage du zinc par « bain-marie »)
- bilan d'énergies (créée - stockée - transmise - reçue)
- rôle et performance d'un système asservi (suivi d'une consigne, rejet des perturbations)
- critère de choix d'un capteur de température
- critère de choix d'un gradateur pour une application de chauffage
- mise en service de l'installation (phase de pré-fusion).

$$\text{B.1.2 } \tau_{\text{th}} \approx R_{\text{th}} \cdot C_{\text{th}} \quad \text{avec } C_{\text{th}} = \sum_i M_i C_{\text{th}i}$$

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta\theta}{0,15P} \approx 0,3^\circ \text{ C/W}$$

$$C_{\text{th}} = 1,5 \times 2\,200 + 1,4 \times 4\,191 + 2,3 \times 500$$

huile eau cuve

$$C_{\text{th}} = 10\,317,4 \text{ J/}^\circ\text{C} \quad \tau_{\text{th}} = 3\,095 \text{ s}$$

$$\bullet \quad \theta_e = \theta_0 + P \cdot R_{\text{th}} [1 - e^{-t/\tau_{\text{th}}}] \rightarrow t_c = \tau_{\text{th}} \cdot \ln. \left[\frac{\theta_0 - \theta_{ef}}{P \cdot R_{\text{th}}} + 1 \right]$$

$$t_c = 496 \text{ s}$$

- Solution approchée permettant le calcul du temps nécessaire à la montée en température, t_c :

$$W_u = \sum_i M_i C_i \Delta\theta = P \cdot t_c \cdot \eta$$

$$t_c = \frac{MC_{Th}\Delta\theta}{P.\eta} = 539 \text{ s}$$

Les deux valeurs montrent que les essais sont tout à fait compatibles avec les impératifs pédagogiques (une plus grande masse conduirait à une période d'inactivité).

Temps de fusion (théorique !) de la glace :

$$W_{\text{fug}} = L_{\text{fug}} \times M_g \quad \text{et} \quad t_{\text{fug}} = \frac{W_{\text{fug}}}{\eta P} \quad \text{d'où} \quad t_{\text{fug}} = 611 \text{ s}$$

N.B. *Le temps réel de fusion est supérieur à 20 mn les blocs de glace n'étant pas isothermes et le couplage thermique faible (problème identique au processus réel); ceci génère par conséquent « un temps mort » au niveau de l'expérimentation pouvant être mis à profit, par exemple, par une simulation sur ordinateur du comportement thermique réel.*

B.1.3 $\tau_{\text{th}} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ s}$ et $\tau_{\text{sonde}} = \text{quelques secondes}$:

Soit un ratio $\tau_{\text{th}}/\tau_{\text{sonde}} \gg 1$ ($> 10^4$!) qu'il faudrait retrouver approximativement sur le banc didactique, ce qui impose la sonde possédant la plus faible constante de temps; le choix se portera donc sur :

- * **Thermocouple type 12-M - 0,5 mn de diamètre -**
- * **couple T**

$$\text{d'où } \tau_{\text{th}}/\tau_{\text{sonde}} = 3\,095 / 30 \times 10^{-3} \approx 10^5$$

B.1.4 **Sortie 4/20 mA.**

B.1.5 **Amplificateurs d'instrumentation** à grand gain, grande réjection de mode commun, faible bruit et faibles dérives statiques (influence de la température) + **filtres passe-bas.**

B.1.6 Cf document –réponse B.

B.1.7 **Invariants :**

- **matériel** (gradateur, régulateur),
- **technologique** (thermocouple),
- **fonctionnel** (maintien en température d'un bain liquide).

B.1.8 Solutions possibles :

- **insertion d'un échangeur dans le bain d'eau,**
- **ventilation d'air chaud ou froid en surface,**
- **introduction de morceaux de glace** ($m_g = \text{quelques grammes}$).

Question B2

B.2.1 Il est **impératif**, tout d'abord d'introduire le principe de la galvanisation d'autre part de présenter **le contexte industriel (ligne de galvanisation Sollac-Desvres)** ceci peut se faire à travers :

- **la présentation de transparents** (description des principes et intérêts de la galvanisation),
- **la présentation d'une cassette vidéo ou d'un CD-ROM** (présentation de l'installation réelle),
- **une visite d'entreprise** (quand cela est possible).

B.2.2 **Buts de la séance :**

- **justifier la présence d'une boucle de régulation** en température en insistant sur le cahier des charges de l'installation réelle,
- **valider** le choix des différents constituants,
- **procéder** à la mise en service du banc didactique en respectant un cahier des charges.

B.2.3 Fiche-contrat avec objectifs (terminaux et intermédiaires) à atteindre, matériel mis à disposition, travail à effectuer (préparatoire et expérimental), grille d'évaluation...

B.2.4 Réponses et commentaires attendus.

PARTIE C

Question C1

C.1.1 → si la pression augmente l'essorage est plus efficace car la force appliquée au zinc augmente donc ez ↘,
 → si la distance buse/bande (D) augmente l'effet de la pression s'atténue l'essorage est moins efficace d'où ez ↗,
 → si la vitesse de défilement augmente, le temps de passage dans la zone d'essorage diminue et donc l'essorage est moins efficace d'où ez ↗.

C.1.2 On sait que $d(u^n) = n \cdot u^{n-1} \cdot du$ donc :

$$\frac{\partial m}{\partial D} = K \cdot \sqrt{\frac{V}{P_f}} \qquad \frac{\partial m}{\partial V} = K \cdot D \cdot \sqrt{\frac{1}{P_f}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{V}} \qquad \frac{\partial m}{\partial P_f} = \frac{K \cdot D}{2} \cdot \sqrt{\frac{V}{P_f}} \cdot \frac{1}{P_f}$$

C.1.3 On utilise un développement limité au 1^{er} ordre autour de (D_o, V_o, P_{fo}) en vertu de :

$f_{(x_o+h)} = f_{(x_o)} + h \cdot f'_{(x_o)} + \dots$ il vient :

$$m = m_o + \frac{\partial m}{\partial D} dD + \frac{\partial m}{\partial V} dV + \frac{\partial m}{\partial P_f} dP_f$$

$$m = K \cdot D_o \cdot \sqrt{\frac{V_o}{P_{fo}}} + \xi_m + \alpha \cdot \Delta D + \beta \cdot \Delta V - \mu \cdot \Delta P$$

C.1.4 On peut donc compenser autour d'un point de repos, les variations de masse (dus par exemple à une variation de distance buses/bandes) par une correction de pression (terme $\mu <$). En théorie on pourrait même annuler les variations de D et de V à condition qu'il n'y ait pas de perturbations...

$$\alpha = K \cdot \sqrt{\frac{V_o}{P_{fo}}} \qquad \beta = K \cdot D_o \cdot \sqrt{\frac{1}{P_{fo}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{V_o}} \qquad \mu = \frac{K \cdot D_o}{2 \cdot P_{fo}} \cdot \sqrt{\frac{V_o}{P_{fo}}}$$

Question C.2

C.2.1 A vitesse constante, $V = 1$ m/s et à condition que la tôle reste tendue (boucle de traction active) :

$$\psi = \frac{L}{V} = 59,5 \text{ s}$$

C.2.2 - variations de température du bain → viscosité du zinc modifiée
 - vibrations, ou modifications de la tension de tôle
 - dérèglement de la boucle interne de régulation de pression

C.2.3 La commande s'effectue par pression de fluide or $\frac{\partial m}{\partial P_f} < 0$.

Le tracé de l'abaque de Black correspondante est donné en annexe la facteur de résonance vaut environ **3,5 dB**.

C.2.4 $C_{(p)} = K_c \cdot (1 + \frac{1}{T_i p})$ et $H_{(p)} = \frac{G \cdot e^{-\psi p}}{(1 + T_p p)}$

$$d'o\grave{u} H_{BO(p)} = K_c \cdot \frac{(1+T_i p)}{T_i p} \cdot \frac{G \cdot e^{-\psi p}}{(1+T_p)}$$

$$H_{BO(\omega)} = K_c \cdot \frac{(1+j\omega T_i)}{j\omega T_i} \cdot \frac{G \cdot e^{-j\omega\psi}}{(1+j\omega T)}$$

Pour le tracé de l'abaque de Black-Nichols on a :

$$\rightarrow \text{Gain } G_0 = 20 \cdot \log \left[\frac{0,42}{27,13 \omega} \sqrt{\frac{(1+27,13 \omega^2)}{(1+9,7 \omega^2)}} \right]$$

$$\rightarrow \text{Phase } \varphi_0 = -\frac{\pi}{2} + \text{atan}(\omega T_i) - \text{atan}(\omega T) - \omega \cdot \psi$$

$\rightarrow \omega_0 = 0,013 \text{ rd/s}$ [$f_0 = 2,07 \text{ mHz}$] avec un gain de 1,958 dB

$\rightarrow K_p = -1,958 \text{ dB} \rightarrow K_p = 0,796 \approx 0,8$

C.2.5

$$m_{sc(p)} = \Delta p_{(p)} \left[\frac{G e^{-\psi p}}{1+T_p} + \frac{K_2(1-e^{-T_2 p})}{1+T_3 p} \right]$$

$$F_{(p)} = \frac{G e^{-\psi p}}{1+T_p} + \frac{K_2}{1+T_3 p} - \frac{K_2 e^{-T_2 p}}{1+T_3 p}$$

On veut pour $F_{(p)}$ un premier ordre soit :

$$\mathbf{G = K_2 = -0,42}$$

$$\mathbf{\psi = T_2 = 59,5 \text{ s}}$$

$$\mathbf{T = T_3 = 9,7 \text{ s}}$$

Le signal de retour s'effectue, dans l'idéalité, sans l'influence du retard pur, qui existe toujours bien entendu pour le procédé. La correction s'effectue de manière « anticipée » par rapport au mode précédent (C.2.3).

Bhaly (Editions « Kirk ») propose pour le correcteur PI la technique classique de compensation de pôle soit $T_i = T$ avec $K_p = 1/G$.

C.2.6 La valeur de ψ varie, car la vitesse de ligne change en permanence en fonction du type de produit voulu (épaisseur, largeur, type de revêtement), le compensateur de temps mort (CTM) ne peut donc être réalisé sous forme câblée (encore moins sous forme analogique \Rightarrow **solution numérique programmée**).

C.2.7 Le comportement global est satisfaisant si le gain du régulateur n'est pas trop élevé et si les paramètres du modèle sont obtenus avec une précision suffisante (erreurs : sur $\psi < 1\%$, sur $G \approx 10\%$ et $T \approx 10\%$). Le régulateur de Smith est relativement robuste vis à vis de T par contre toute erreur sur ψ (ou mauvais réglage sur T_3) peut être fatal et conduire à un fonctionnement inacceptable. Une réduction du gain est possible mais conduit à des performances dégradées de la boucle.

Question 3.

C.3.1

$$H_{(p)} = \frac{G \cdot e^{-p(dte+J)}}{1+T_p} = \frac{e^{-pdte} \cdot G e^{-pJ}}{1+T_p}$$

$$H_{(z-1)} = \frac{z^{-d}(b_z^{-1} + b_2 z^{-2})}{1+a_1 z^{-1}} \quad (e^{-pT_e} \rightarrow z^{-1})$$

Avec :

$$\mathbf{a_1 = -e^{-T_e/T}}$$

$$\mathbf{b_1 = G \cdot (1 - e^{-(J-T_e)/T})}$$

$$\mathbf{b_2 = G \cdot e^{-T_e/T} [e^{J/T} - 1]}$$

C.3.2 On veut $b_2 = 0$ (pour obtenir un régulateur de complexité constante) donc $J = 0$. Pour satisfaire cette condition quelle que soit celle de ψ (donc de V), il faut donc que T_e s'adapte à la valeur de V (ceci nécessite donc d'introduire comme paramètre de réglage la vitesse de bande).

$$\text{C.3.3} \rightarrow \psi = \frac{L}{V} + \delta = dT_e \Rightarrow T_e = \frac{1}{d} \left(\frac{L}{V} + \delta \right)$$

A.N. $T_e = \frac{1}{7} \cdot (59,5 + 3,5) = 9 \text{ s}$

On constate sur le schéma général de la régulation (annexe 12) que le calcul de T_e est effectivement issue d'un module de mesure de V .

C.3.4 $a_1 = -e^{-9/9,7} = -0,3954$
 $b_1 = -0,415 (1 - e^{-9/9,7}) = 0,251$

C.3.5 → Le correcteur RST permet de prédéfinir des objectifs en poursuite (suivi de la consigne) et en régulation (rejet des perturbations) indépendants. Chacun des éléments R, S est alors décrit par un polynôme de degré adapté dont la recherche des coefficients est donné par exemple par la résolution de l'identité de Bezout :

$$[A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + z^{-\alpha} \cdot B(z^{-1}) \cdot R(z^{-1}) = P(z^{-1})].$$

Des logiciels (PC-REG d'Adaptech) permettent le placement des pôles de manière automatique.

→ La marge de retard (par analogie à la marge de phase ou de gain) n'est pas toujours suffisante, on préfère pour obtenir un comportement optimal modifier les coefficients du correcteur RST à chaque fois que V est modifiée. Les différentes valeurs sont mémorisées dans une table.

PARTIE D

Question D.1

PC	Automate	Variateur	Moto	Procédé
Essorage	Programme	de vitesse	ventilateur	d'essorage
		Interface		

Détail du procédé d'essorage

Question D.2

- **P.C : micro-ordinateur** (dialogue avec automate par liaison série et génération de la consigne de pression)
- **Automate programmable** : API muni de cartes d'extension (Module PID – carte d'entrées/sorties avec entrée 4/20 mA)
- **Variateur de vitesse** : (ATV – 18 ou équivalent)
- **Moto-ventilateur** : ventilateur centrifuge (surpresseur)
- **Capteur de pression** : capteur piézo-électrique avec sortie 4/20 mA.

Question D.3

Le but du banc d'essai est de reproduire **approximativement** le fonctionnement de la boucle interne de pression qui participe au dispositif d'essorage pneumatique sur l'installation réelle.

Liaisons avec le référentiel

→ **Contenus associés** (domaine AII)

* Conversion d'une grandeur physique en une information électrique : principe physique du capteur de pression, interfaçage.

* Systèmes programmables industriels :

- API
- Protocole d'échange, réseaux locaux
- micro-ordinateur industriel

* asservissements :

- principe
- stabilité

→ **Capacités visées**

* **justifier** les éléments techniques relatifs à l'équipement de pilotage d'un automatisme [T24]

* **définir** les critères de choix au niveau des grandeurs caractéristiques d'exploitation concernant les capteurs [T23.T24]

* **contrôler** la conformité fonctionnelle d'un sous ensemble [T5]

* **diagnostiquer** la cause probable d'une défaillance [T62]

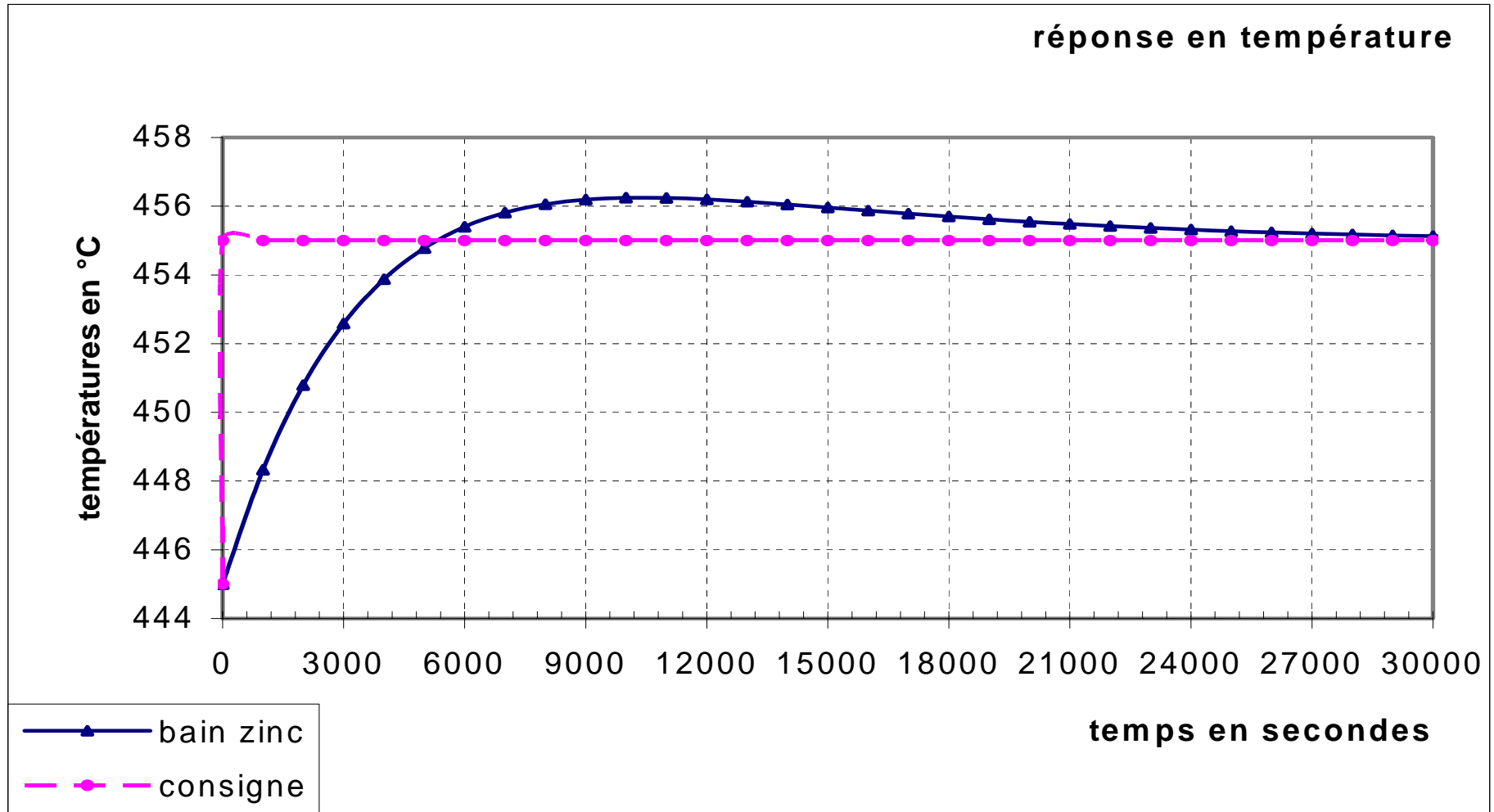
Document Réponse A-1

	Surface en m²	Température en °C	Pertes par convection en W	Emissivité	Pertes par rayonnement en W	Pertes totales en W	Résistance thermique en °C/W
Cuve acier (rebords, extérieurs goulotte...	1,29	465	11 481	0,6	12 704	24 185	R_{dae} = 0,0184
Plomb	1,9	470	17 100	0,35	11 221,3	28 321,3	R_{dp} = 0,0159
Cuve acier (rebords intérieurs, renforts....)	0,923	465	8 214,7	0,6	9 089,74	17 304	R_{dai} = 0,0257
Zinc	5,98	460	52 624	0,3	28 635,7	81 259,7	R_{dz} = 0,00542

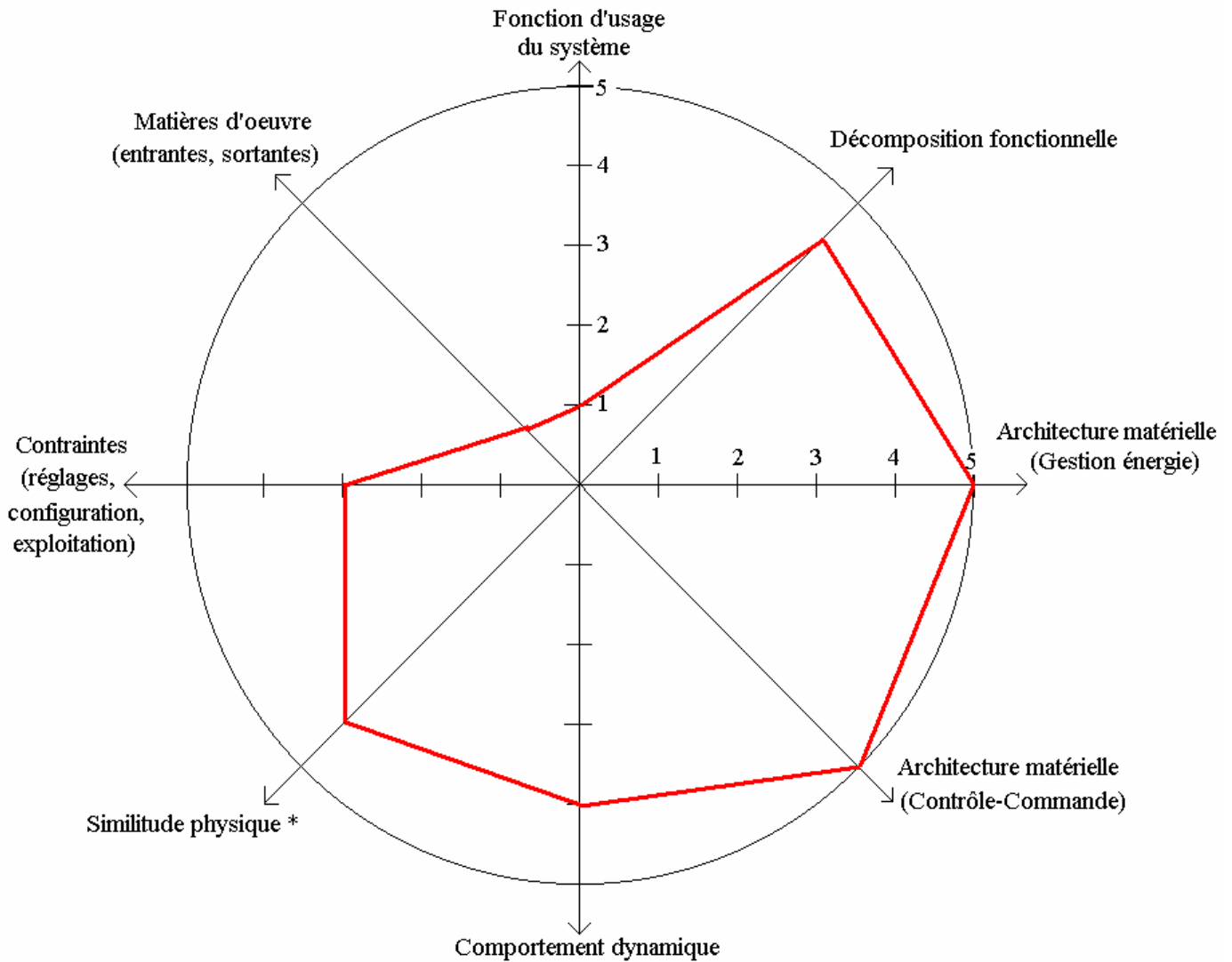
Document réponse A-2

	Masse volumique en kg.m⁻³	Masse en kg	Chaleur massique (à 460 °C) en J.kg⁻¹.°C⁻¹	Capacité thermique en kJ.°C⁻¹
Cuve	7 800	11 463	675	7 737,53
Renforts IPN + goussets + goulotte	7 800	1 283	675	866,03
Rouleaux de guidage	7 800	2 600	580	1 508,00
Zinc	6 904 (à 454°C)	50 000	498	24 900
Plomb	10 444 (à 454°C)	50 000	155	7 750
TOTAL		115 346		42 761,56

Document réponse A-3



Document réponse B



* On pourra comparer sur les deux équipements les grandeurs adimensionnelles suivantes :

- rapport inertie thermique cuve/inertie thermique des fluides,
- rapport température fluide caloporteur/température du bain utile
- rapport constante de temps thermique/période de découpage du gradateur
- rapport constante de temps thermique/constante de temps des sondes de température...