

BREVET TECHNICIEN SUPÉRIEUR
INFORMATIQUE ET RÉSEAUX POUR L'INDUSTRIE ET LES
SERVICES TECHNIQUES

E3 – PHYSIQUE APPLIQUÉE

SESSION 2014

Durée : 3 heures

Coefficient : 3

Matériel autorisé :

- Toutes les calculatrices de poche y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique sous réserve que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante (Circulaire n°99-186, 16/11/1999).
- Tout autre matériel ou document est interdit.

Le sujet se compose de 13 pages, numérotées de 1/13 à 13/13.

Il comporte :

- 1 formulaire : page 10
- 6 documents-réponses : pages 11 à 13 **à rendre obligatoirement agrafés à la copie.**

BTS INFORMATIQUE ET RÉSEAUX POUR L'INDUSTRIE ET LES SERVICES TECHNIQUES		Session 2014
E3 – Physique appliquée	Code : 14IRSPA1	

Les céramiques techniques : un marché en pleine expansion

Les céramiques ont connu depuis une vingtaine d'années de nouvelles applications dans des domaines de pointe.

Les céramiques techniques jouent un rôle important dans les défis technologiques lancés à l'industrie.

Les céramiques techniques sont classées en deux catégories :

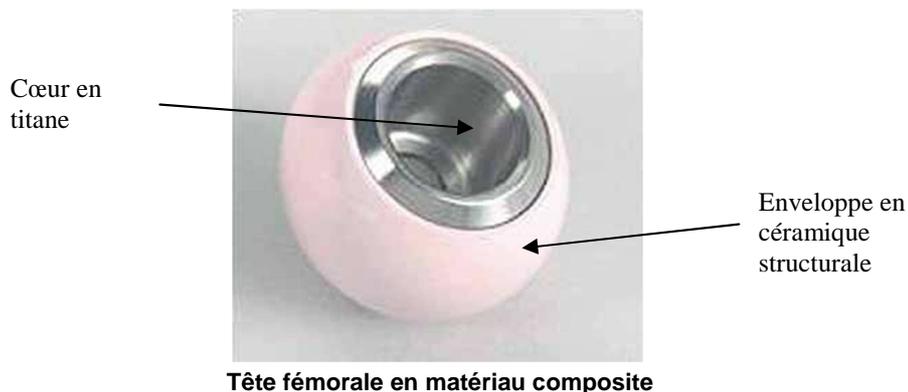
- les **céramiques fonctionnelles** utilisées dans le domaine des composants électroniques.
- les **céramiques structurales** essentiellement employées dans le secteur biomédical.

Exemple : les prothèses de hanche.

Les plus répandues sont celles composées d'une tête en alliage de titane ou chrome-cobalt montée sur une tige fémorale en titane.

Ce système s'articule dans une cupule en polyéthylène fixée sur la hanche. Des débris de polyéthylène apparaissent à cause du frottement tête-cupule. L'usure du polyéthylène peut atteindre quelques millimètres en une dizaine d'années. Ceci provoque une ostéolyse fémorale et limite la durée de vie de la prothèse.

La tête métallique de la prothèse est progressivement remplacée par une tête composée d'une partie métallique en titane associée à une partie en céramique structurale.



La France est un acteur important pour ce qui est des céramiques structurales monolithiques grâce à de grands groupes comme Saint-Gobain et des PMI dynamiques (C&C, Céramiques Techniques et Industrielles,...).

L'étude porte sur l'opération de frittage des céramiques.

Le sujet comporte 4 parties indépendantes

A. Les céramiques techniques : un marché en pleine expansion

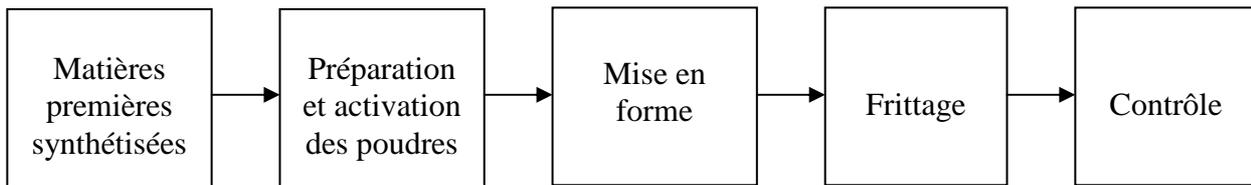
B. Mesure de température

C. Transmission des données numériques au centre de contrôle-régulation

D. Régulation de température dans l'enceinte

A. Les céramiques techniques

Les principales étapes de fabrication des céramiques techniques sont représentées sur le schéma fonctionnel ci-dessous :



Le frittage est un procédé de fabrication consistant à chauffer une poudre sans atteindre la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux.

Les installations de frittage flash SPS sont composées d'une enceinte refroidie par eau, d'un système de presse hydraulique et d'un pilotage informatisé qui contrôle la température qui sera étudié dans les parties suivantes.

I. À l'aide du document 1 de l'annexe 1 page 8, montrer au moins un intérêt d'une tête de prothèse en matériau composite (enveloppe en céramique structurale associée à un cœur en métal).

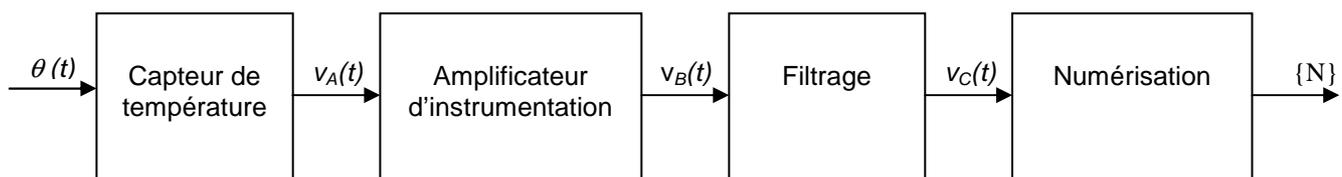
II. Analyser le document 2 de l'annexe 1 page 8 pour justifier un avantage du procédé de frittage FAST/SPS par rapport au procédé de frittage conventionnel.

B. Mesure de température

Afin de maîtriser la cohésion des grains et la granulométrie, le cahier des charges de l'opération de frittage des céramiques structurales impose, dans l'enceinte, une température homogène et donnée. La valeur de cette température dépend de la céramique produite et peut varier de 600°C à 1100°C.

Une mesure précise de la température est donc nécessaire pour l'opération de contrôle-régulation du procédé. Pour cela le capteur doit avoir une sensibilité la plus grande possible.

Schéma fonctionnel du module de mesure de température :



I. Choix du capteur de température

On mesure la température en différents points de l'enceinte à l'aide de capteurs à thermocouples.

On souhaite déterminer le type de capteur le plus adapté à la mesure parmi les thermocouples de type B, K, J, E. Les caractéristiques statiques de transfert de ces différents thermocouples sont données annexe 2 figure 3 page 9.

1. Donner la définition de la sensibilité S d'un capteur. On notera m le mesurande et s la grandeur électrique de sortie du capteur.
2. Compléter le tableau représenté sur le document réponse 1 page 11.
3. Le choix se porte sur le capteur à thermocouple de type J. Justifier ce choix.

II. Amplificateur d'instrumentation

Lors d'une opération de maintenance sur les capteurs, le technicien est amené pour des contraintes d'approvisionnement à utiliser le thermocouple type N.

La sensibilité moyenne S_N de ce capteur vaut $38 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Pour le fonctionnement de la chaîne de mesure, la relation entre la valeur moyenne $\langle v_B \rangle$ de la tension de sortie $v_B(t)$ de l'amplificateur d'instrumentation et la température θ exprimée en $^\circ\text{C}$ doit vérifier :

$$\langle v_B \rangle = k \cdot \theta \text{ avec } k = 5 \text{ mV}/^\circ\text{C}.$$

Montrer que l'amplification A de l'amplificateur d'instrumentation doit être réglée à la valeur $A_N = 130$.

III. Analyse du signal de mesure v_B pour une température θ_1

La température de l'enceinte est constante et égale à θ_1 . Le signal v_B issu de la mesure de cette température subit une pollution harmonique basse fréquence qui ne modifie pas sa valeur moyenne mais qui doit être éliminée avant transmission.

Le spectre en fréquence du signal v_B obtenu est représenté annexe 2 figure 4 page 9. La raie de rang zéro correspond à la tension image de la température de l'enceinte.

1. À partir de la valeur moyenne donnée par le spectre de la tension image de la température, déterminer la valeur θ_1 , température de l'enceinte.
2. Relever la fréquence du fondamental de la pollution harmonique.

IV. Élimination de la pollution harmonique : filtrage

Le diagramme du gain du filtre analogique utilisé est donné document réponse 2 page 11.

1. Caractéristiques du filtre

Déterminer en justifiant :

- 1.1. le type de filtre utilisé,
- 1.2. la valeur maximale du gain puis la valeur maximale de la transmittance du filtre
- 1.3. mesurer la pente de l'asymptote. On fera apparaître sur le document réponse 2 page 11 les constructions graphiques nécessaires à sa détermination.
- 1.4. la bande passante à -3dB. On fera apparaître sur le document réponse 2 page 11 les constructions graphiques nécessaires à la détermination.

2. Réponse du filtre

Le signal v_B est appliqué à l'entrée de ce filtre, le signal de sortie du filtre est la tension v_C .

- 2.1. Déterminer la valeur moyenne $\langle v_C(t) \rangle$ de la tension v_C .
- 2.2. Justifier que le filtre permet de supprimer la pollution harmonique.
- 2.3. Justifier que la tension de sortie v_C est l'image de la température de l'enceinte.

3. Étude expérimentale

Décrire le protocole expérimental permettant de tracer le diagramme de gain du filtre représenté sur le document réponse 2 page 11.

V. Numérisation

Le dispositif de numérisation comprend un échantillonneur bloqueur suivi d'un convertisseur analogique numérique.

Rappel : la relation entre la tension d'entrée v_c du dispositif de numérisation et la température θ de l'enceinte exprimée en $^{\circ}\text{C}$ est :

$$v_c = k \cdot \theta \text{ avec } k = 5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}.$$

Le domaine de mesure de température est 600°C à 1100°C .

À la valeur minimale 600°C de la température à mesurer, le C.A.N associe la valeur numérique 0.

À la valeur maximale 1100°C de la température à mesurer, le C.A.N associe N_{\max} . On désire numériser toutes les 10 secondes avec une résolution d'au moins 2°C .

1. Calculer la fréquence f_E d'échantillonnage.
2. Calculer la variation Δv_c de la tension d'entrée correspondant une variation $\Delta\theta$ de 2°C .
3. Déterminer la largeur du domaine de variation de la tension $v_c(t)$.
4. Déterminer le nombre minimum de bits du C.A.N à utiliser.

C. Transmission des données numériques au centre de contrôle-régulation

Les données numériques issues du module de mesure sont transmises au centre de contrôle et de régulation situé à une distance de 50 m de l'enceinte de frittage. On utilise une transmission par modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying). Il s'agit d'une modulation par changement de phase deux états d'une porteuse analogique sinusoïdale de fréquence f_0 .

La phase de la porteuse analogique sinusoïdale peut prendre deux valeurs :

- soit 0 radian quand le bit à transmettre est « 1 » ;
Le signal modulé est de la forme $s_m(t) = \sin(2\pi f_0 t)$.
- soit π radians quand le bit à transmettre est « 0 ».
Le signal modulé est de la forme $s_m(t) = \sin(2\pi f_0 t + \pi)$.

1. Déterminer le temps de propagation t_p du signal de référence, sachant que la ligne a une longueur de 50 m et que la célérité de l'onde transmise est $c_T = 200\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

2. Débit binaire net

Une séquence de transmission comprend 64 bits.

Dans cette séquence, sur les 64 bits, seuls 8 bits sont utiles : ceux correspondant à la transmission de la température. Les autres bits servent à la synchronisation, l'identification et au contrôle.

La vitesse de transmission est de 1000 bauds.

2.1. Calculer la durée d'émission T_B d'un bit.

2.2. Calculer la durée t_s d'une séquence.

2.3. Calculer le débit binaire net D_n défini comme le nombre de bits utiles transmis par seconde.

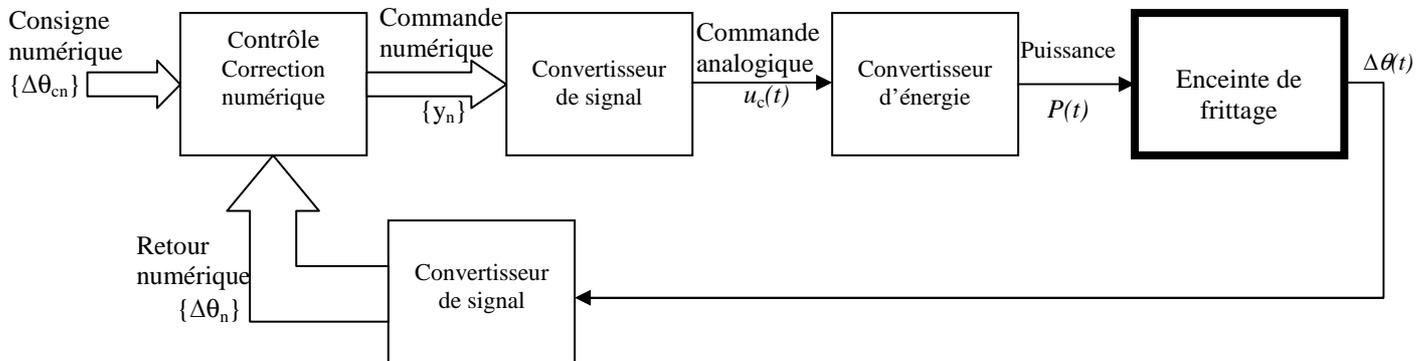
3. Le signal modulé s_m représenté sur le document réponse 3 page 12 correspond aux 8 bits utiles.

Décoder les 8 bits utiles de la séquence binaire correspondante en complétant le document réponse 3 page 12 sachant que le premier bit utile émis est un « 1 ».

D. Régulation de température dans l'enceinte

Le cahier des charges de l'opération de frittage des céramiques structurales impose une température homogène et de valeur imposée dans l'enceinte.

La régulation de l'écart de température $\Delta\theta$ entre l'intérieur de l'enceinte et l'extérieur dont la température est supposée constante, peut être décrite par la chaîne de commande suivante :



I. Comportement thermique de l'enceinte de frittage : modélisation

Pour optimiser le fonctionnement du système, il est nécessaire de modéliser le comportement thermique de l'enceinte. Pour établir ce modèle on réalise des essais en laboratoire.

On applique un échelon de puissance P à l'entrée de l'enceinte de frittage :

- $P(t) = 0$ pour $t < 0$ s
- $P(t) = P_0 = 100$ W pour $t \geq 0$ s

L'exploitation de la réponse $\Delta\theta$ à cet échelon de puissance P permet d'établir la loi d'évolution suivante :

$$360 \frac{d(\Delta\theta(t))}{dt} + \Delta\theta(t) = 2 P(t)$$

Cette équation différentielle peut se mettre sous la forme : $\tau \frac{d(\Delta\theta(t))}{dt} + \Delta\theta(t) = K \cdot P(t)$

1. Identification

- 1.1. Déterminer l'ordre de la réponse. Justifier.
- 1.2. Quelle est la durée du régime transitoire considérée comme égale au temps de réponse à 5% ?

2. Résistance thermique

En régime permanent, une température d'équilibre s'établit dans l'enceinte caractérisée par la relation : $\Delta\theta_f = R_{th} \cdot P_0$.

Avec R_{th} résistance thermique qui dépend de la surface de séparation entre l'enceinte et le milieu ambiant et des conditions de refroidissement : nature du fluide ambiant (air, eau, huile) et mouvement forcé ou non (ventilation).

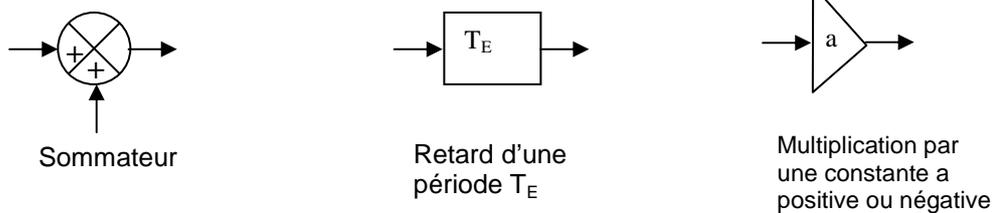
Déterminer la valeur de R_{th} résistance thermique de l'enceinte.

II. Caractéristiques de la correction numérique

On note $\{e_n\}$ la séquence numérique d'entrée et $\{y_n\}$ la séquence numérique de sortie. L'algorithme peut se traduire par l'équation :

$$y_n = 2,06 \cdot e_n - 2 \cdot e_{n-1} + y_{n-1}$$

1. S'agit-il d'un algorithme récursif ou non récursif ? Justifier.
2. Représenter la structure de l'algorithme du correcteur en utilisant autant de fois que nécessaire les symboles suivants :



3. Une séquence échelon numérique unité $\{\Gamma_n\}$ est appliquée à l'entrée du correcteur. Calculer les 5 premiers termes de la réponse indicielle y_n et compléter le tableau du document réponse 4 page 12.
4. Représenter graphiquement sur le document réponse 5 page 13 la réponse indicielle y_n en fonction du rang n .
5. Justifier la fonction Intégrale de ce correcteur numérique proportionnel-intégral.

III. Transmittance en z du correcteur

$E(z)$ et $Y(z)$ sont les transformées en z des séquences numériques $\{e_n\}$ et $\{y_n\}$.

À partir de l'algorithme, montrer que la transmittance en z du correcteur peut s'écrire :

$$C(z) = \frac{Y(z)}{E(z)} = \frac{a z - b}{z - 1} \quad . \quad \text{Préciser les valeurs de } a \text{ et } b.$$

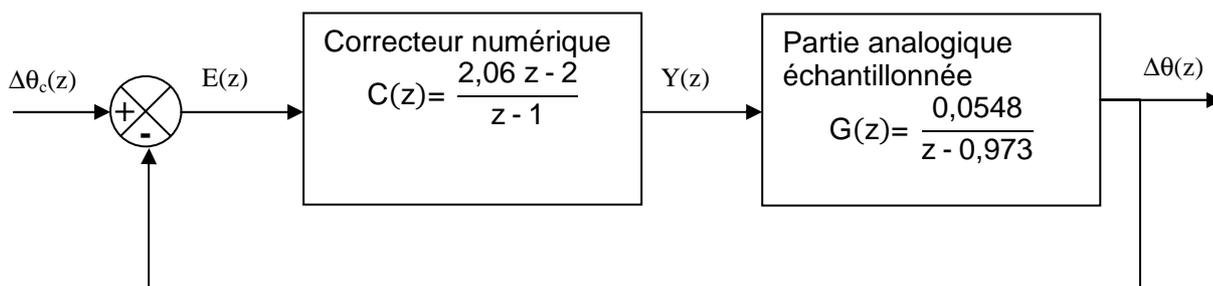
IV. Précision de la régulation de température

On souhaite déterminer la précision de la régulation.

On appelle $G(z)$ la fonction de transfert équivalente de la partie analogique échantillonnée de l'asservissement.

On suppose que le temps d'acquisition et de traitement du signal est très inférieur à la période d'échantillonnage T_e .

Dans cette condition, le schéma bloc discret équivalent de cette régulation devient :



On applique une consigne numérique correspondant à un échelon d'amplitude de 100°C.

1. À l'aide du formulaire page 10, donner l'expression de $\Delta\theta_c(z)$, la transformée en z de $\Delta\theta_c$.
2. Exprimer l'erreur statique $E(z)$ en fonction de $\Delta\theta_c(z)$, $G(z)$ et $C(z)$.
3. En utilisant le théorème de la valeur finale conclure sur la précision du système.

$$\text{On montre que } (z - 1) \cdot E(z) = \frac{100 \cdot z}{1 + G(z) \cdot C(z)}$$

4. Synthèse

Pour respecter le cahier des charges de l'opération de frittage, les performances du correcteur numérique doivent vérifier :

- pas de dépassement de la température de consigne ;
- en régime permanent, pas d'écart avec la consigne ;
- durée du régime transitoire inférieure à 5 minutes.

Le choix se porte sur une correction numérique PI.

Avant de valider expérimentalement ce choix de correcteur, on réalise une simulation de la réponse du système régulé à l'aide du logiciel Scilab développé par l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA).

Le système bouclé est soumis à un échelon de consigne d'amplitude égale à 100°C.

Sur le document 6 page 13 sont représentées les réponses de la simulation:

- en pointillé la réponse du système bouclé analogique sans correction.
- en trait plein — la réponse du système bouclé échantillonné-bloqué avec la correction numérique PI.

- 4.1. Avec quelle fréquence f_e d'échantillonnage la simulation du système bouclé corrigé est-elle réalisée ?
- 4.2. Quel est l'ordre du modèle de référence choisi pour le système bouclé corrigé ? Justifier.
- 4.3. À partir du document 6 page 13, justifier que le système bouclé corrigé remplit le cahier des charges.
- 4.4. Quelle est la performance que le correcteur a améliorée pour remplir le cahier des charges ?
Quel est l'élément du correcteur qui a permis cette amélioration ?

Annexe 1

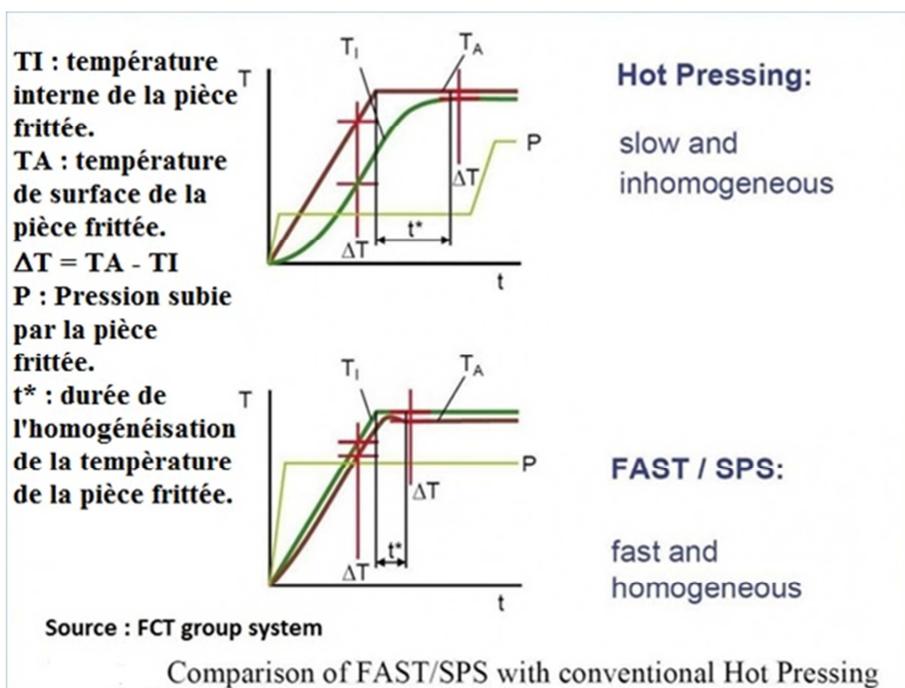
Document 1 :

Le frittage des céramiques structurales permet :

- de maîtriser la taille des grains de poudre (granulométrie) et la densité du matériau d'une poudre qui ne fond pas,
- d'obtenir des matériaux durs mais fragiles, à porosité contrôlée, inertes chimiquement (faible réactivité chimique et bonne tenue aux corrosions) et thermiquement,
- de maîtriser les dimensions des pièces produites : comme il n'y a pas de changement d'état, les variations de volume, de dimensions, sont peu importantes par rapport à la fusion (absence de phénomène de retrait).

Document 2 :

Évolution des température interne (TI) et température de surface (TA) de l'élément pendant le frittage pour les procédés HP et FAST/SPS.



Annexe 2

Figure 3 : source : Article *Thermocouple* de Wikipédia en français (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>).

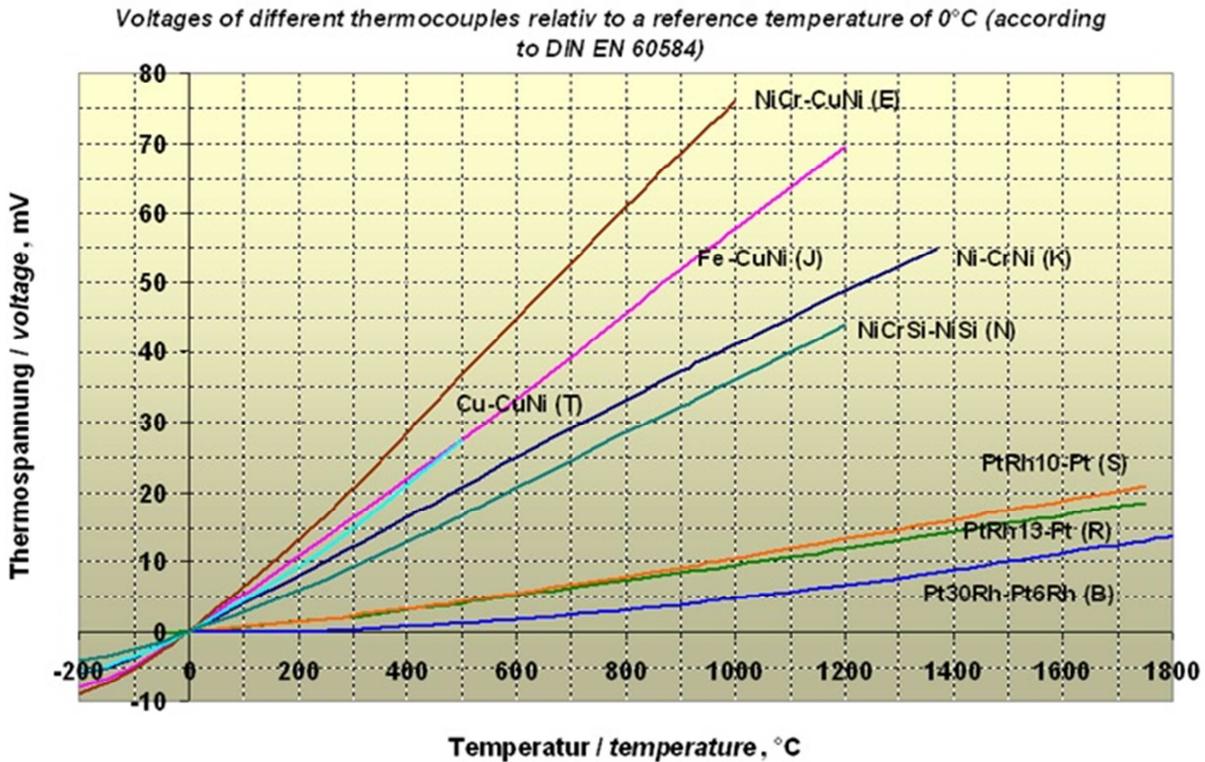
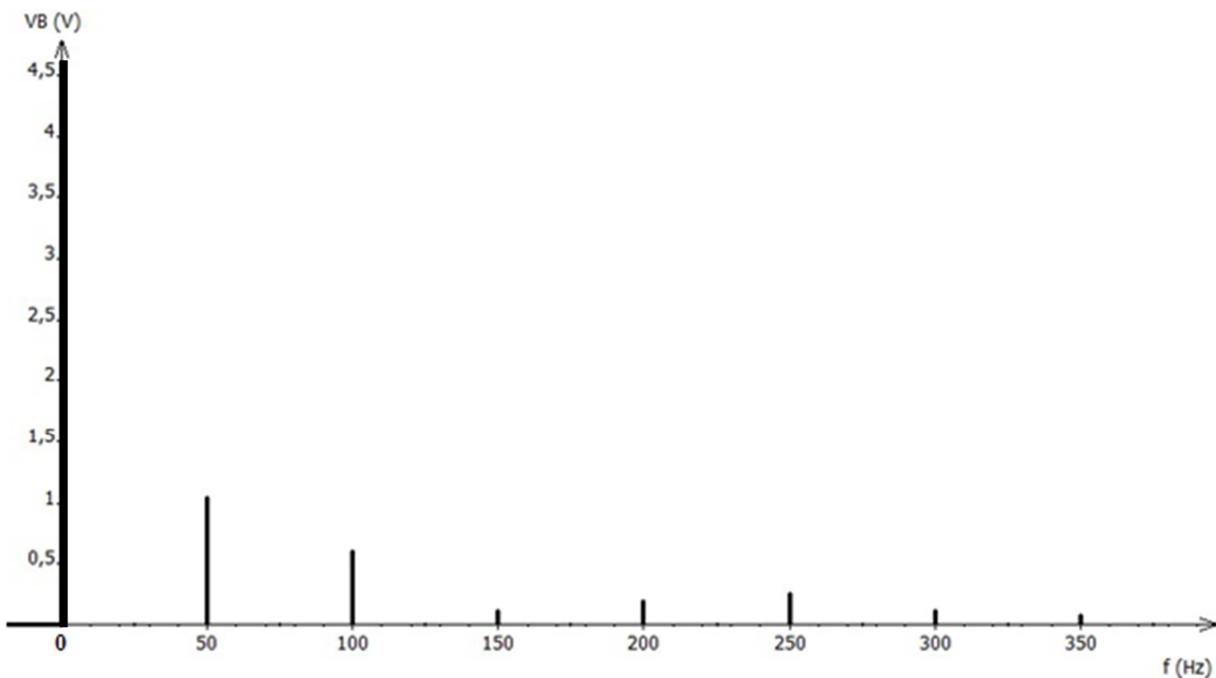


Figure 4 : spectre d'amplitude du signal de sortie de l'amplificateur d'instrumentation



Formulaire

Transformées de Laplace

Propriétés de la transformée de Laplace	
Théorème de la valeur initiale	$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow +\infty} pF(p)$
Théorème de la valeur finale	$\lim_{t \rightarrow +\infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p)$
Table des transformées de Laplace	
$f(t)$	$F(p)$
Impulsion unité : $\delta(t)$	1
Echelon unité : $\Gamma(t)$	$\frac{1}{p}$
Rampe : at	$\frac{a}{p^2}$
$1 - e^{-t/\tau}$	$\frac{1}{p(1 + \tau p)}$
Dérivée : $\frac{d(f(t))}{dt}$	$pF(p) - f(0^+)$
Propriétés de la transformée en Z	
Théorème de la valeur initiale	$x_0 = \lim_{z \rightarrow 1} X(z)$
Théorème de la valeur finale	$\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)X(z)$
Table des transformées en Z	
$\{x_n\}$	$X(z)$
Séquence impulsion unité : $\{\delta_n\}$	1
Séquence échelon unité : $\{\Gamma_n\}$	$\frac{z}{z-1} = \frac{1}{1-z^{-1}}$
Séquence rampe $\{a.n.T_e\}$	$a.T_e \frac{z}{(z-1)^2} = a.T_e \frac{z^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$

**Documents réponses
à rendre obligatoirement avec la copie**

Document réponse 1

Thermocouple	Type B	Type K	Type J	Type E
Domaine de linéarité	1300°C à 1800°C		500°C à 1200°C	300°C à 1000°C
Sensibilité moyenne en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	8	40		78

Document réponse 2

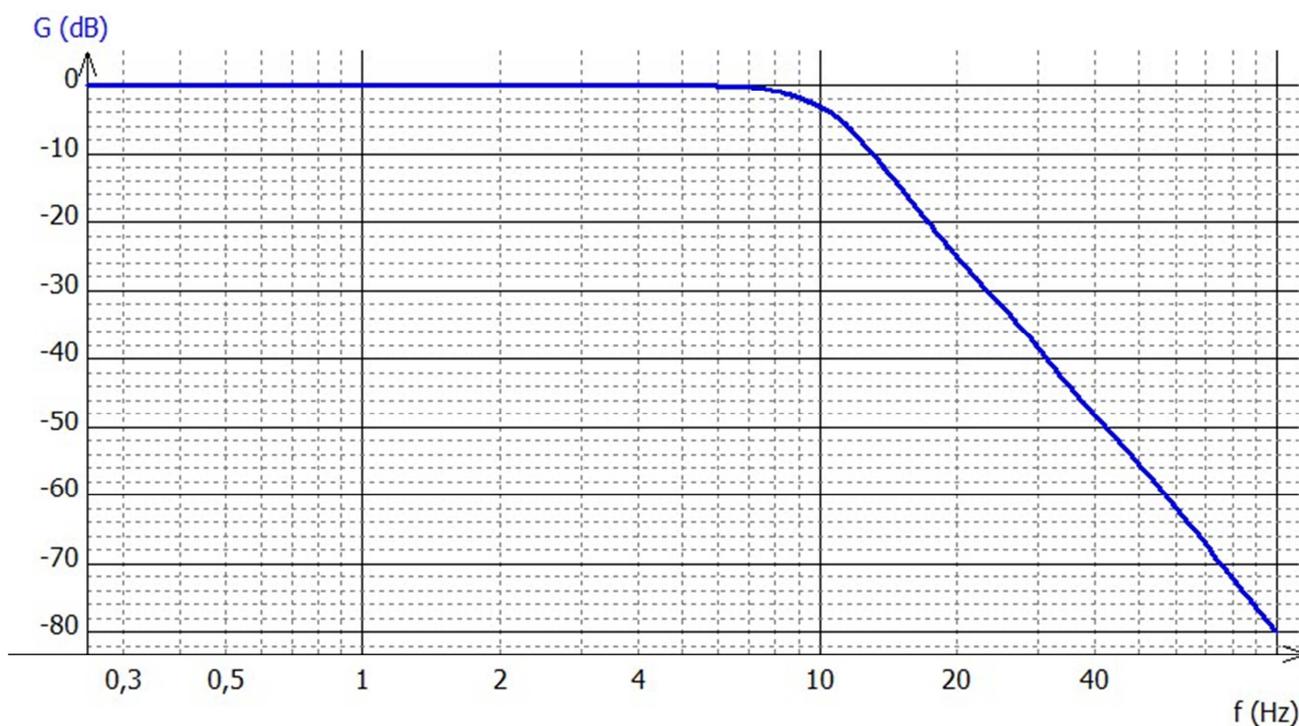


Diagramme de gain du filtre analogique

**Documents réponses
à rendre obligatoirement avec la copie**

Document réponse 3

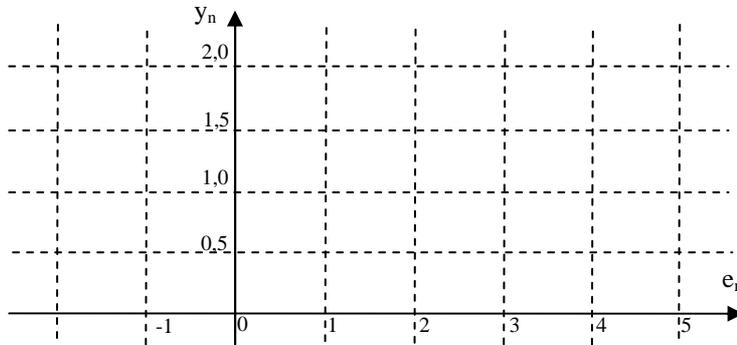


Document réponse 4

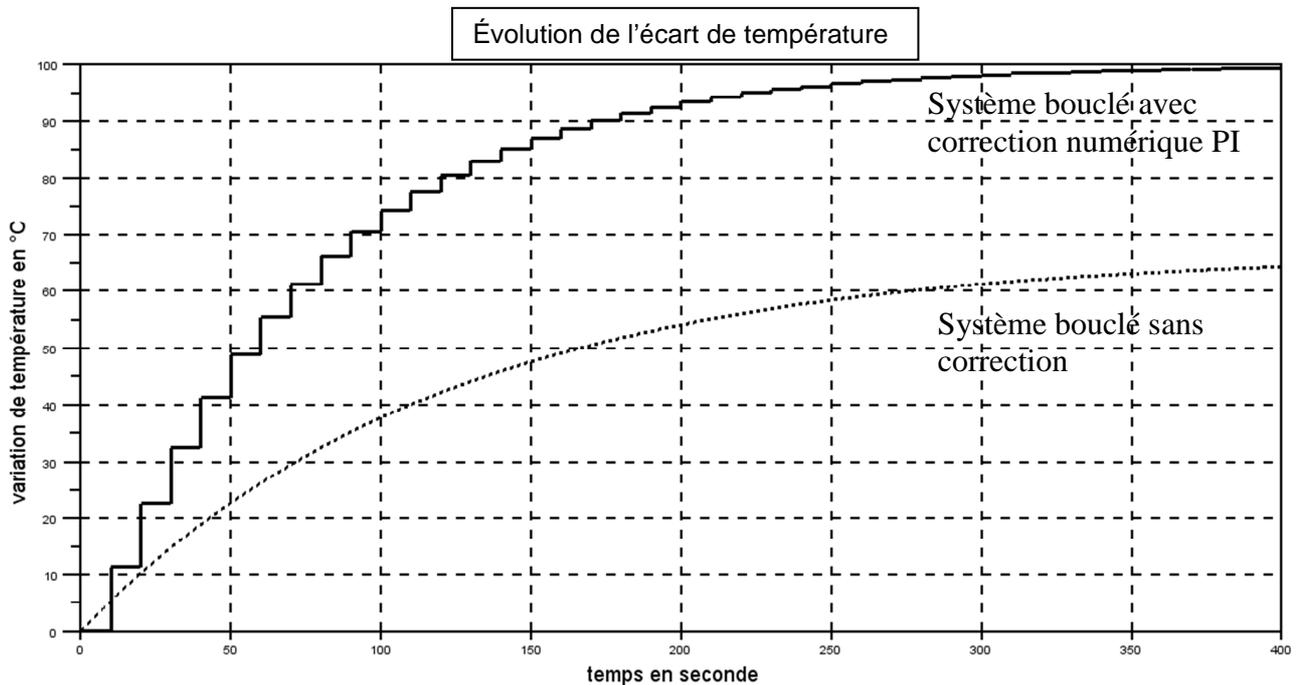
Rang n	-2	-1	0	1	2	3	4	5
$\{\Gamma_n\}$	0	0	1	1	1	1	1	1
$\{y_n\}$	0	0						

Documents réponses à rendre obligatoirement avec la copie

Document réponse 5



Document réponse 6



Simulation réalisée sous Scilab (copyright INRIA)
réponse à un échelon de consigne 0-100°C