

Modules Arduino Asservissement de température

Principe de l'expérience

On se propose de réaliser un asservissement de température à l'aide d'un module Arduino R3.

Il s'agira de réguler et commander la température d'un cylindre à section circulaire de cuivre ou Dural de 60 mm de diamètre et 40 mm d'épaisseur. Un capteur de température de type LM35DZ de sensibilité $10\text{mV} \cdot \text{C}^{-1}$ est placé environ au centre du bloc (collé à l'aide d'une pâte thermique).

Un module Peltier de type TEC1-12106 est pris en sandwich entre le bloc de métal et un dissipateur. Une pâte permet un bon contact thermique indispensable (amélioration possible par la mise en place d'un ventilateur côté dissipateur). Le bloc peut être entouré d'un isolant, cela permet de plus grandes variations de température pour une même puissance thermique mise en jeu.

Deux modes d'utilisation sont possibles : le signal de commande de température peut être appliqué par un générateur de tension ou bien de façon purement numérique (sketch Arduino).

Le module Arduino permet d'acquérir la tension délivrée par le capteur (après une amplification d'un facteur 10) et éventuellement la tension de commande. Ces grandeurs converties sont ensuite traitées numériquement de façon à obtenir une correction de type PID (pour l'instant seulement PI). Ces grandeurs numériques sont ensuite converties en une tension dite de commande qui leur est proportionnelle. Cette tension de commande doit "piloter" le courant circulant dans le module Peltier (en effet les modules Peltier exploitent le fait qu'une jonction entre deux matériaux parcourue par un courant échange de la chaleur proportionnellement à ce courant). Le courant sera délivré par un montage de type Push-Pull inclus dans une boucle d'asservissement mettant en œuvre un amplificateur différentiel.

L'ensemble est schématisé par le diagramme de la figure 1.

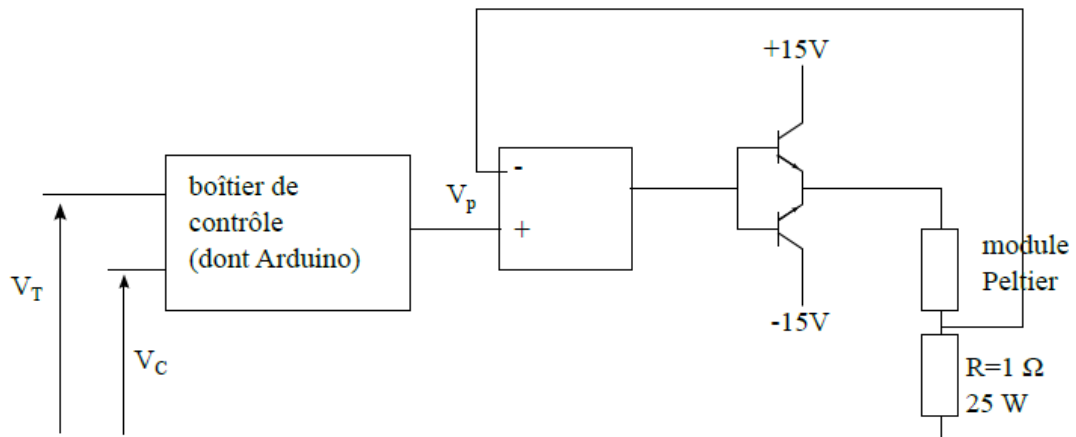


Figure 1 – Schéma de principe d'un asservissement de température. V_T est la tension délivrée par le capteur de température et V_C la tension de commande. Le boîtier de contrôle qui contient essentiellement un module Arduino délivre une tension V_p . Cette tension est appliquée à l'aide d'une boucle impliquant un A.O. aux bornes d'une résistance de puissance de valeur 1Ω . Le module Peltier est donc parcouru par un courant V_p/R .

Boîtier de contrôle

Conversion analogique numérique

La tension V_T est amplifiée d'un facteur 10 (à régler) à l'aide d'un montage non-inverseur, elle est appliquée à l'entrée analogique A_0 du module Arduino par l'intermédiaire d'un circuit de protection (diode Zener 4.7V) polarisée par une résistance de $1\text{ k}\Omega$. La tension de commande est appliquée de même à l'entrée analogique A_1 . Ces tensions sont converties en nombres N_T et N_C respectivement avec un facteur de conversion de 208.4V^{-1} (convertisseur 10 bits entre 0 et 5 V : $1024/5\text{V}$). Dans le cas où le signal de commande est purement analogique l'étape de conversion V_C vers N_C est inutile, la commande est donnée par une tension fictive traduite en nombre N_C via le même facteur de conversion.

— Le gain global après conversion est donc de : $20.48\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

PID

Un filtre numérique de type PI est ensuite appliqué au signal d'erreur ($N_C - N_T$). Il s'agit d'un gain G_0 et d'une intégration de temps caractéristique τ_i . Le signal filtré au temps $(n + 1)t_e$ est donné par la fonction de transfert suivante (t_e est la période d'échantillonnage du signal) :

$$N_e(n + 1) = G_0(N_C - N_T)(n) + N_e(n) + 1/\tau_i t_e (N_C(n) - N_T(n))$$

Conversion numérique analogique

Ce nombre est de signe quelconque. Le module Arduino ne possède pas réellement de convertisseur numérique analogique. Il dispose cependant de sorties numériques fonctionnant selon le principe de la MLI (modulation de largeurs d'impulsions) ou PWM en anglais. Ces modulations opèrent sur des signaux numériques (entre 0 et 5V) de fréquence 980 Hz environ sur la sortie D5 de l'Arduino Uno R3 (d'autres sorties offrent une fréquence moitié). La valeur moyenne de ces signaux est proportionnelle à un nombre compris entre 0 et 255. Ces sorties se comportent donc comme des convertisseurs numériques analogiques 8 bits pour des variations relativement lentes comparées aux 980 Hz ce qui sera bien le cas pour ces asservissements de température. Le défaut de ce principe est que l'on ne peut convertir que des nombres positifs en tension moyennes positives. L'astuce consiste donc à traduire l'erreur numérique de manière à se placer autour du milieu de la gamme de conversion, soit en ajoutant le nombre 128 à l'erreur. Un décalage de tension équivalente à 128 et opposé est ensuite appliquée au signal analogique soit -2.5V .

— Le gain de cette conversion est de 0.0195V .

Etage de puissance : conversion tension-courant et module Peltier

La boucle impliquant le module Peltier permet de commander un courant proportionnel au signal de commande en tension. Le gain de ce dernier étage est de 1AV^{-1} (résistance de 1Ω). Le module TEC1-12106 est donné pour $50\text{ W}/6\text{A}$.

— Le gain du module vaut environ 8WV^{-1} .

En résumé

En l'absence d'intégrateur le gain global de l'ensemble est de $3,2\text{ }G_0\text{ W}\cdot\text{C}^{-1}$, soit $6,4\text{ W}\cdot\text{C}^{-1}$ pour une valeur de G_0 de 2 qui semble donner des résultats "raisonnables" (pas d'instabilité et une précision "correcte"). Autrement dit un écart de 1°C entre température de commande et température mesurée résulte en une puissance thermique de $6,4\text{ W}$ pour rétablir l'équilibre. L'ensemble est résumé figure 2.

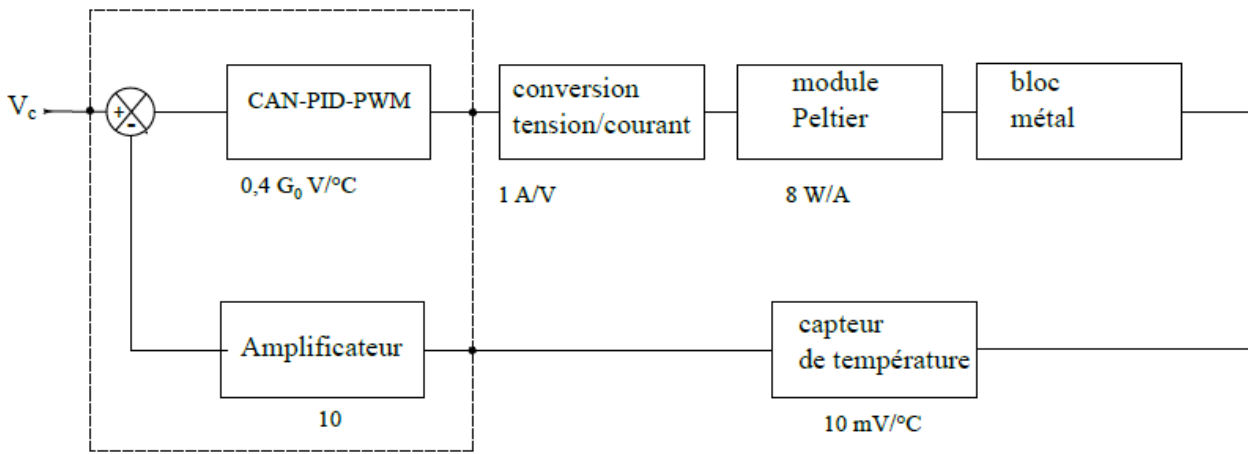


Figure 2 – schéma complet de la boucle d'asservissement : la valeur des gains connus est indiquée sous les blocs. Le gain du PID est indiqué dans le cas d'une simple correction proportionnelle (se reporter au texte pour son expression générale). Le bloc de métal se comporte en première approximation comme un système du premier ordre dont l'étude reste à faire. Sur ce schéma la tension délivrée par le capteur de température est amplifiée et comparée à une tension de commande V_c (mode EXTERNE). Un autre mode de fonctionnement (mode INTERNE) utilise une commande purement numérique (sous forme de créneaux réglables en amplitude et fréquence). Le boîtier de commande contenant entre autre le module Arduino est schématisé par le cadre en pointillés.

La capacité thermique du bloc de cuivre est de 385 JK^{-1} . Pour un écart de température de 1°C et un courant Peltier de 1A la durée pour atteindre l'équilibre thermique est de 48 s . Ce temps est beaucoup plus petit que le temps caractéristique d'évolution naturelle du bloc (dépendant de son isolation thermique) mais plus grand que le temps de diffusion sur la taille du bloc qui vaut environ 15 s .

Conseils pratiques, défauts et améliorations possibles

- On pourra dans un premier temps effectuer un asservissement de autour de la température ambiante.
- Les alimentations de puissance du Push-Pull seront limitées à 1 ou 2 A . Le courant limite est de 6A mais plus le courant est élevé plus des non-linéarités pourraient devenir gênantes (effet Joule).
- Des durées des 5 à 10 minutes sont nécessaires pour observer correctement les régimes transitoires.
- Deux potentiomètres permettent de régler le gain d'un amplificateur ($\times 10$) et un décalage de tension (-2.5V), ils sont a priori réglés en sortie d'usine.
- Pour le mode "externe" (commande par une tension), se souvenir que le gain du capteur de température est de $10\text{mV} \cdot \text{C}^{-1}$ mais que la tension de commande doit prendre en compte un gain interne $\times 10$ ($100\text{mV} \cdot \text{C}^{-1}$).
- En mode interne (commande purement numérique), seul des signaux carrés on été programmés. Il serait très facile, quoique peu intéressant, de générer n'importe quel type de signal de commande.
- Toujours en mode interne il n'y a pas de signal analogique de commande disponible (à ajouter dans une future version ?) pour comparaison commande/mesure.
- La stabilité de la boucle d'asservissement dépend du sens du branchement du module Peltier. A tester au cas par cas.
- Le correcteur dérivé est à programmer et tester.

Exemples d'asservissements

Voici deux exemples d'asservissement en mode INTERNE. On remarque les oscillations de température plus importantes lorsque le gain du correcteur intégral est plus élevé (temps d'intégration plus faible).



Figure 3 – Deux exemples d'asservissements en mode INTERNE (en jaune : signal de synchronisation (sortie numérique D5), en bleu : courant du module Peltier, en rose : température) : la commande en température est un créneau de $22.0 \pm 1^\circ\text{C}$, $G_0 = 2$. Figure de droite le temps d'intégration vaut 12 s, de gauche 100 s. La période du signal de commande est de 700 s.

ANNEXE

Quelques grandeurs caractéristiques du cuivre et de l'aluminium (source wikipedia) :

	Cuivre	Dural
masse volumique (kg m^{-3})	8960	2900
conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	390	237
capacité thermique massique ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	385	897
diffusivité thermique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	117	98.8

