

## Modélisation de la régulation en température du plateau chauffant d'une imprimante 3D

### Structure utilisée pour la partie chauffante de l'imprimante 3D

#### Structure matériel

L'imprimante 3D, objet de l'étude, réalise des objets par dépôt de couches successives de matière sur un plateau.

Certaines imprimantes 3D de milieu de gamme comportent un plateau chauffant. Le chauffage permet d'assurer la bonne adhérence de la matière sur le plateau, il permet aussi de limiter les contraintes thermiques lors de la fabrication de l'objet. Le dispositif de chauffage, constitué d'un fil résistif, est disposé à la périphérie du plateau.

Les têtes d'impression comportent elles aussi une résistance chauffante positionnée dans un bloc d'aluminium comme le montre l'illustration 2.

Dans ce TP, nous allons nous intéresser uniquement à la régulation du plateau chauffant. Ce plateau est constitué :

- D'une plaque en aluminium (carré de côté  $a=214$  mm et d'épaisseur  $e=3$  mm) équipé d'une résistance chauffante sur toute la surface supérieure ( $R=5$  Ohm) sur lequel est monté un plateau en verre permettant le dépôt des couches successives de matières et d'un thermocouple.
- La résistance est alimenté par la carte de puissance situé sur la carte Arduino. La tension est stabilisée à 24V.
- D'une carte de commande Arduino Mega 2560 sur laquelle est installée la partie puissance permettant d'alimenter les différents éléments de l'imprimante. Ici, nous utiliserons uniquement le hacheur du plateau et le conditionnement du thermocouple.
- D'un thermocouple, placé au centre de la plaque en verre, qui mesure la température de celle-ci à tout instant. Le dispositif de conditionnement des informations fournies par le thermocouple est intégré à la carte Arduino.

Dans ce TP nous utiliserons uniquement le hacheur du plateau et le conditionnement du thermocouple.

- Le hacheur permet de moduler la tension d'alimentation de la résistance chauffante entre 0 et 24V à partir d'une consigne dans le programme codée sur 8 bits (0-255) et envoyée sur la broche 8 de la carte de commande. La mesure analogique de la tension aux bornes du thermocouple (branché sur la broche 14 ; CAN sur 10 bits) permet d'obtenir une image  $M$  (en incréments) de la température  $T$  (en degrés) du plateau. La loi permettant de passer de la température en numérique à une valeur en degrés est non linéaire et déterminée expérimentalement. Une régression linéaire (coefficient de corrélation de 0,99) permet d'établir la relation :

$$T = 0.19 * T_{num} + 15.4$$

Avec  $T$ , la température en degré et  $T_{num}$  la valeur numérique envoyée par le capteur de température.

- La carte de commande peut être directement commandée à partir d'une programmation en langage Python. Les instructions seront développées dans la partie suivante.

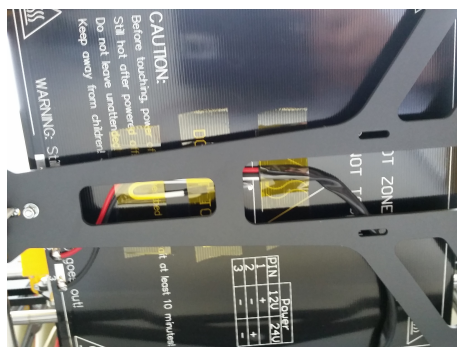
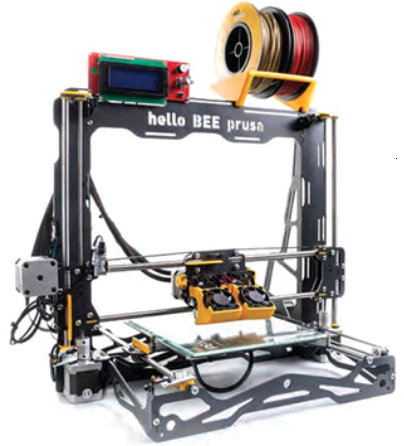


Illustration 1: Plateau chauffant

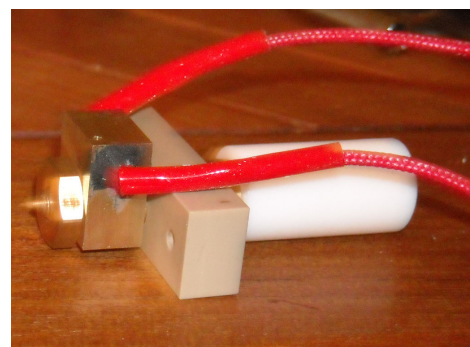


Illustration 2: Tête d'impression

## Structure logicielle

Un module, traduit en langage Python, a été développé afin de pouvoir acquérir les informations relatives au fonctionnement du plateau chauffant. Nous allons décrire brièvement les méthodes, disponibles dans ce module, que nous utiliserons par la suite.

```

from py2duino import *           # Importation du module py2duino sous Python.

MACARTE = Arduino(5)           # Définition de l'objet MACARTE, carte Arduino utilisée sur le
                                # port COM associé.
TEMPERATURE = AnalogInput(MaCarte1, pin) # Définition de l'objet TEMPERATURE qui permettra de
                                # récupérer les informations analogiques du thermocouple
                                # branché le pin « pin » de la carte Arduino définie ci-dessus.
RESISTANCE = AnalogOutput(MaCarte1, pin) # Définition de l'objet RESISTANCE qui permettra de piloter la
                                # résistance informations analogique du thermocouple branché
                                # le pin « pin » de l'Arduino défini ci-dessus.

```

Les informations analogiques renvoyées (Input) ou acquises (Output) par la carte Arduino sont codées sur 8 bits. Ces informations peuvent donc prendre des valeurs entières allant de 0 à 255.

Afin de récupérer ou d'envoyer une information à l'imprimante, il suffira alors d'utiliser les méthodes `.read()` ou `.write()` associées aux classes **AnalogInput** et **AnalogOutput**.

## Objectifs

L'objectif du travail proposé est d'élaborer un modèle approché du plateau chauffant d'une imprimante 3D, sans utiliser d'équations afin de retrouver les paramètres dimensionnant de la chaîne d'énergie. La modélisation sous Scilab sera comparée aux acquisitions réalisées sur une imprimante 3D.

Le but ultime sera de régler un correcteur numérique PID pour asservir la température du plateau chauffant.

## Essai en Boucle Ouverte - Identification de modèle de comportement du plateau

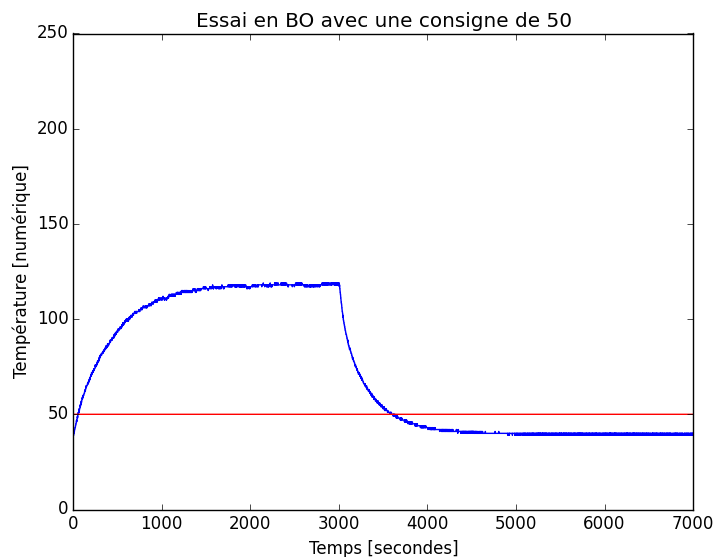


Illustration 3 : Essai en boucle ouverte (montée et descente en température)

Pour pouvoir déterminer un premier modèle de comportement du plateau chauffant, il est nécessaire de déterminer les constantes caractéristiques de ce dernier. Pour cela, une première étude en boucle ouverte est menée. Elle nous permet de déterminer la température de convergence ainsi que la constante de temps de notre système. L'illustration 1, met en avant la phase de montée et de descente en température de notre plateau chauffant. On identifie clairement un système du premier ordre. La consigne d'entrée pour cette première expérience est de 50 en valeur numérique. Ce qui correspond vis à vis de la carte Arduino à une consigne en tension de 4.70 V.

Le modèle multiphysique que nous allons devoir compléter par la suite nécessite de connaître (pour une étude thermique), les valeurs de la capacité thermique massique (Illustration 4) de notre plaque ainsi que la valeur de la

constante de convection (Illustration 5) avec l'extérieur (ici l'air). Pour pouvoir faire le lien entre ces deux constantes caractéristiques de notre système, nous allons expliciter les équations qui régissent l'échange de chaleur au sein du plateau chauffant.



Illustration 4 :  
Capacité

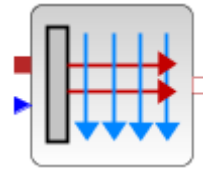


Illustration 5 :  
Convection

Le modèle thermique du plateau est directement issu du premier principe : la variation d'énergie interne ( $C.T$ ) est égale à la puissance reçue de la part de la résistance moins la puissance perdue par échange avec l'air par convection.

$$C \frac{dT}{dt} = P_{elec} - P_{convection}$$

où  $C$  est la capacité thermique de la plaque, constitué d'une superposition d'une plaque en aluminium et d'une plaque de verre.

$P_{elec}$  est la puissance reçue par effet Joule telle que :  $P_{elec} = U^2 / R$

$P_{convection}$  est la puissance perdue, modélisée par la loi  $P_{convection} = H(T - T_0)$ .  $H$  est le coefficient d'échange thermique de la plaque.

Ne connaissant pas les constantes caractéristiques ( $H$  et  $C$ ) pour notre système nous allons pouvoir les déterminer à partir de l'essai en boucle ouverte présenter sur l'illustration 6. Sur ce tracé, les valeurs numériques ont été converties en utilisant la fonction définie précédemment.

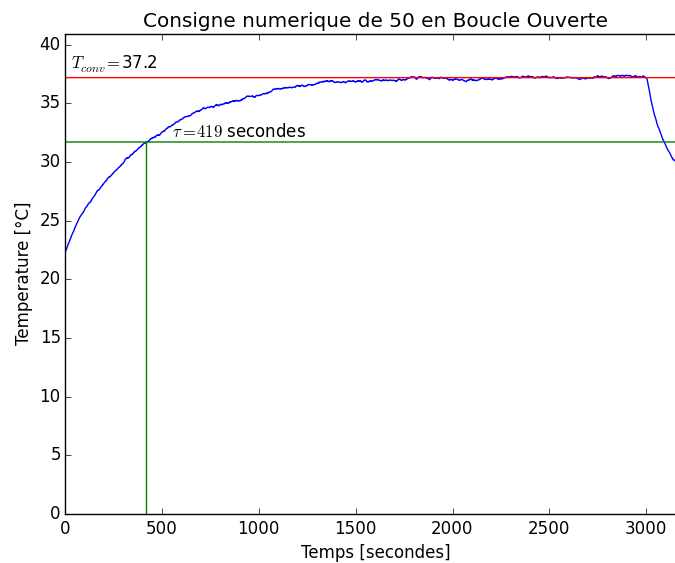


Illustration 6 : zoom sur l'essai en boucle ouverte (phase de montée en température)

On peut remarquer à ce stade, que lorsque nous traçons la réponse à un échelon du plateau pour une consigne de 50 (4.8 V) puis une consigne de 100 (9.6 V), la réponse n'est pas linéaire (Illustration 7) et la valeur asymptotique n'est pas doublée. En effet, la valeur asymptotique tend vers :

$$\frac{U^2}{R.H}$$

Ce système n'est donc pas un système linéaire. De ce fait, la modélisation multiphysique est adaptée pour traiter ce problème.

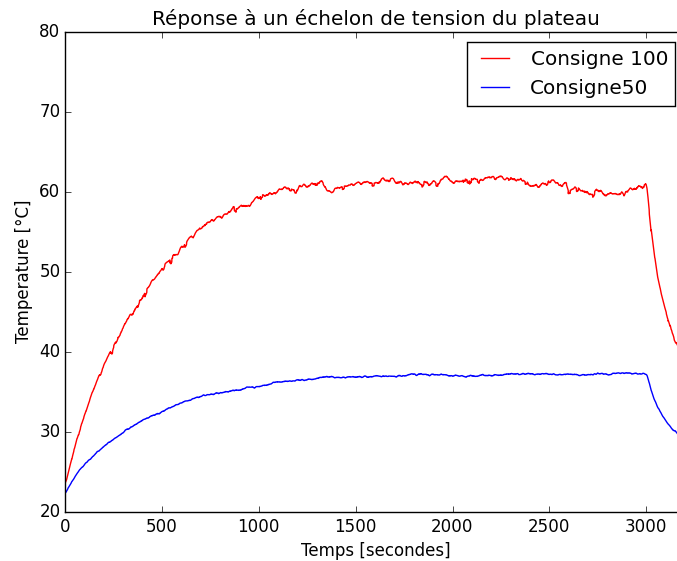


Illustration 7: Non linéarité en tension du plateau chauffant

Nous pouvons, à partir des équations énoncées précédemment, que l'on transpose dans le domaine de Laplace, déterminer les constantes caractéristiques d'un tel système.

$$C \Delta T p = U^2 / R - H \Delta T$$

$$\left(1 + \frac{C}{H} p\right) \Delta T = \frac{U^2}{R.H}$$

avec  $\frac{U^2}{R.H} = \left(\frac{\text{consigne 24}}{255}\right)^2 \cdot \frac{1}{R.H}$

**A partir des équations précédentes, en déduire un système d'équations permettant de déterminer H et C, les constantes caractéristiques du système.**

### Modèle multiphysique

La première manipulation que nous venons de réaliser nous permettra de renseigner les valeurs des différents blocs de notre modélisation.

Réaliser le modèle de la boucle ouverte du plateau chauffant ci-contre, en utilisant les blocs dans SIMM / Thermique. Les blocs TIME et ISCOPE sont dans SIMM / Utilitaire / Visualisation

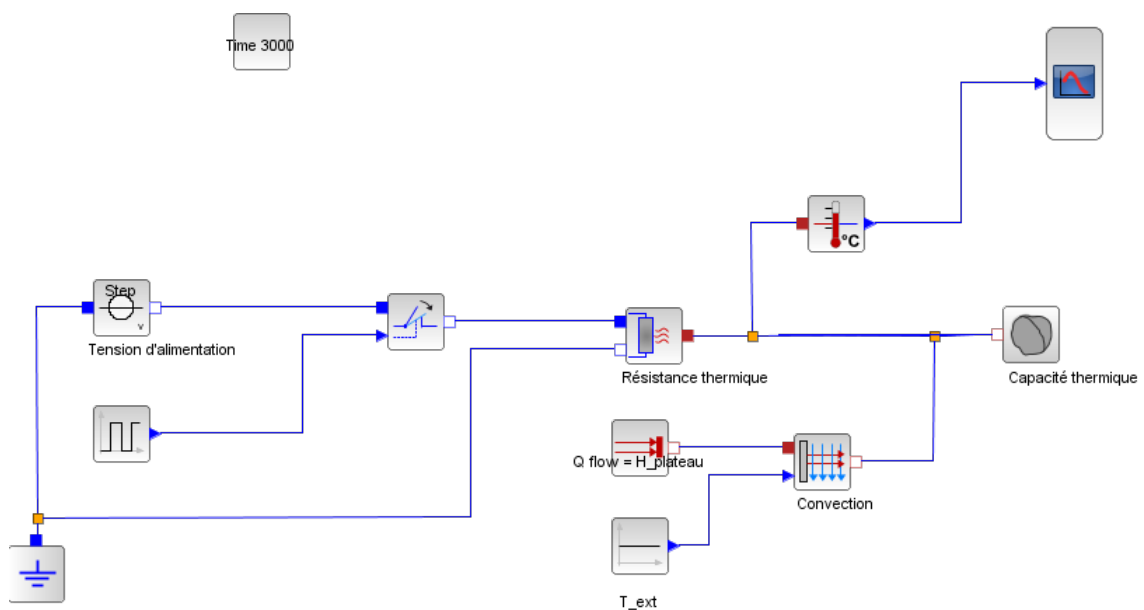


Illustration 8: Modèle en boucle ouverte

**Prendre une durée de 3000s avec 10 000 points.**

**Ajouter dans le contexte les paramètres suivants :**

- **$U_{\text{plateau}} = 4,8$  // tension d'alimentation**
- **$R_{\text{plateau}} = 5$  // résistance du plateau**
- **$C_{\text{plateau}} = 0$  // valeur à changer en fonction de l'expérience précédente**
- **$H_{\text{plateau}} = 0$  // valeur à changer en fonction de l'expérience précédente**

**Modifier alors chacun des blocs en conséquence.**

Comme nous avons pu le voir précédemment, pour pouvoir lancer une simulation numérique à partir du logiciel de simulation Scilab, il est nécessaire de connaître la valeur de la capacité thermique de la plaque notée **C\_plateau** ainsi que celle du coefficient d'échange surfacique entre notre plaque et l'air, notée **H\_plateau**. Ici, c'est bien la convection avec l'air ambiant qui permettra de limiter l'accumulation de chaleur dans la plaque. De plus, il est nécessaire de connaître la résistance de la plaque chauffante. Une mesure sur le système permet de déterminer cette résistance. Ici, nous prendrons  $R_{\text{plateau}} = 5 \text{ Ohm}$  pour la résistance de notre plaque.

Suite à notre première expérience, on peut donc en déduire que la valeur du coefficient d'échange convectif vaut :

$$H = 0,29 \text{ W.K}^{-1} \text{ d'où } C = 101 \text{ J.K}^{-1}$$

**Remplacer la valeur de la capacité thermique du plateau ainsi que la valeur du coefficient d'échange surfacique par convection puis comparer la valeur de température atteinte par simulation à celles de vos expérimentations.**

L'illustration 9 représente le modèle simulé en boucle ouverte du plateau chauffant soumis à un échelon de tension de 4,8 V.

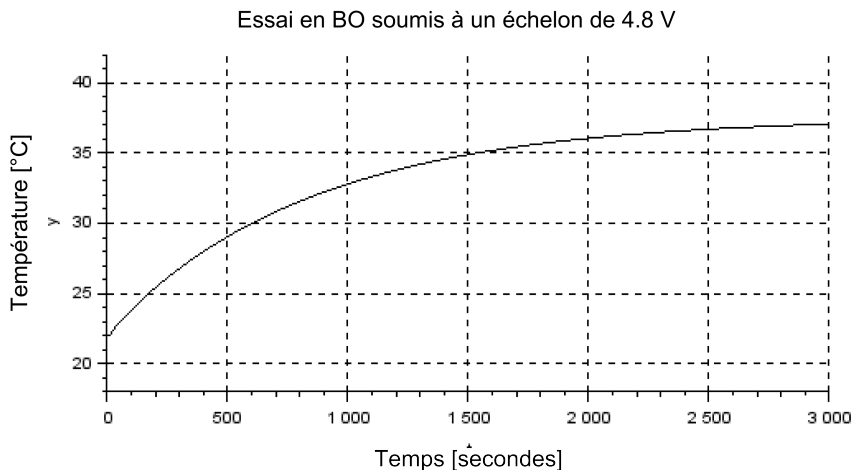


Illustration 9: Essai en boucle ouverte soumis à un échelon de 4,8 V

## Régulation de température - Tout ou Rien

Maintenant que l'on dispose d'un modèle en boucle ouverte, nous pouvons réfléchir au type d'asservissement utilisé.

Le cahier des charges est de pouvoir réguler la température à  $\pm 2$  degrés.

La correction de type *bang-bang* ou *tout ou rien* est la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à chauffer à plein régime jusqu'à atteindre la valeur désirée puis à arrêter de chauffer. La température va donc baisser naturellement. On chauffe à nouveau si on descend de  $2^\circ$  par rapport à la valeur demandée.

**Mettre en place une régulation de type tout ou rien en utilisant le bloc hystérésis CBN\_Hysteresys.**

**Modifier la valeur des paramètres pour obtenir le comportement décrit ci-dessus (Illustration 11).**

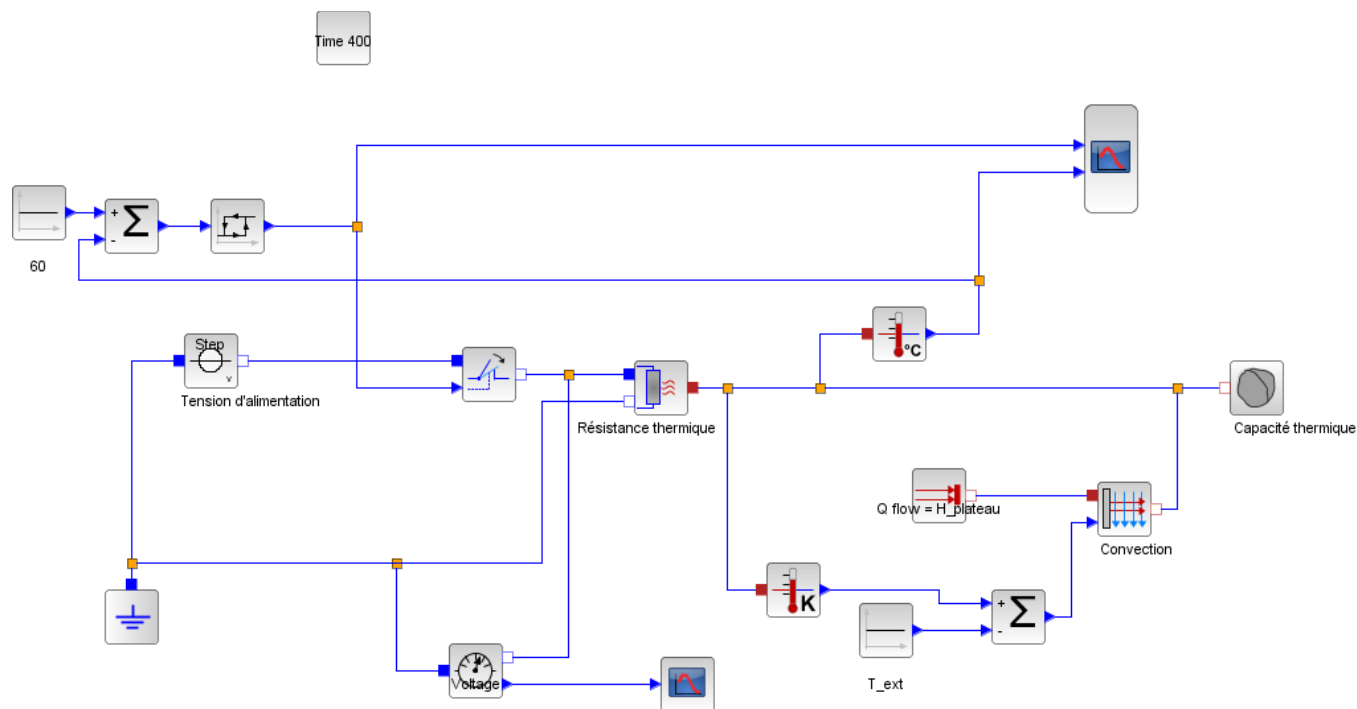


Illustration 10: Régulation tout ou rien

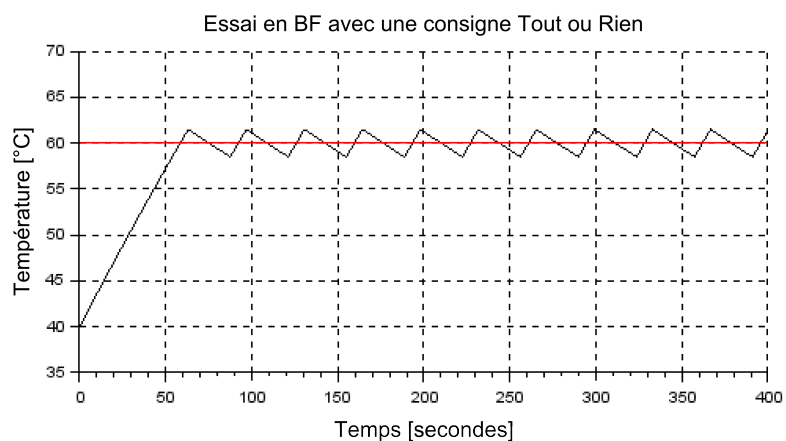


Illustration 11: Régulation tout ou rien (Simulation)

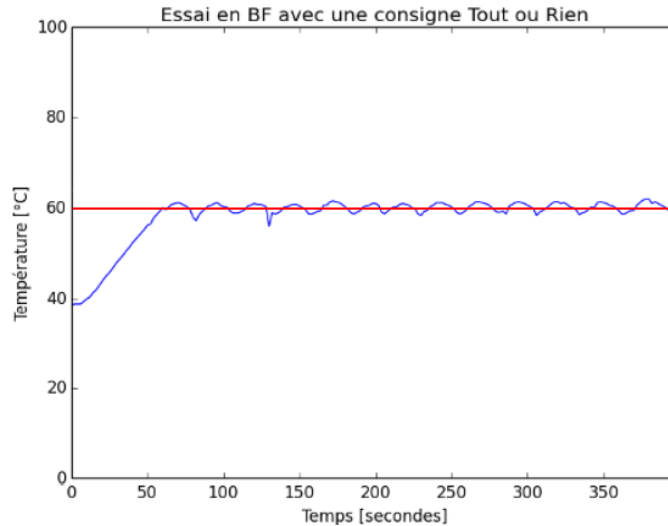


Illustration 12: Régulation tout ou rien (Expérimentation)

## Régulation de température - Correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID)

Afin de limiter la consommation électrique de la machine suite à la régulation tout ou rien, nous pouvons utiliser un correcteur de type proportionnel intégral dérivée.

### Choix de la période d'échantillonnage

Dans le cas d'un correcteur P.I.D., la période d'échantillonnage (qui correspond à l'application de nouvelles commandes successivement) est importante car elle entre en compte dans le correcteur (dérivation, intégration). Il faut donc choisir correctement sa valeur. La période  $T_e$  doit être inférieure à celle du processus (notée  $T$ ).

Très souvent, on pense choisir une valeur très petite pour que les conséquences de la discrétisation soient réduites et que les calculs menés avec le modèle continu soient réalistes. Cependant, cette manière de faire n'est pas judicieuse. En effet, un mauvais conditionnement du signal d'entrée du plateau chauffant peut apparaître si la période d'échantillonnage est trop petite, ce qui conduit en pratique à des comportements inattendus. C'est pourquoi, en général, une période d'échantillonnage comprise entre la moitié et le dixième de la constante de temps du processus est utilisée !

Ainsi dans le cas de l'asservissement de température, on peut choisir une constante de temps environ égale à la moitié de la valeur du retard (on est bien en dessous de la constante de temps du processus mais il faut tenir compte du retard).

*Remarque :* Pour régler la constante de temps  $T_e$ , constante d'échantillonnage, on utilisera donc la valeur du retard due à la conduction thermique dans la plaque (ici celle-ci est de l'ordre de 3 secondes). On donne donc  $T_e = 1,5$  secondes.

### Réglage des correcteurs

Le réglage de ces correcteurs, pour un tel processus, se fait de façon empirique.

**Mettre en place une régulation de type PID en utilisant le bloc MBC\_PID.**

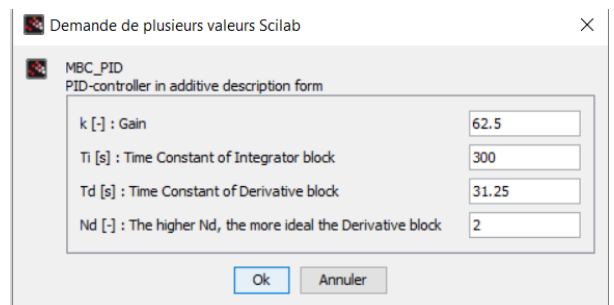
**Tester différentes valeurs de coefficients pour le correcteur PID. On peut remarquer que l'on règle le gain puis les constantes de temps des parties intégrale et dérivative du correcteur.**

Nous utiliserons des valeurs empiriques pour déterminer les coefficients du correcteur. La méthode de réglage recommandée pour le P.I.D. est de régler d'abord  $K_p$  avec l'expression suivante :

$$K_p = \frac{1}{K} \text{coef} \quad (\text{ici coef} = 0,3 \text{ pour optimiser la réponse}),$$

$$\text{puis } K_i = \frac{K_p}{T} \text{ et } K_d = \frac{K_p}{2}$$

**A partir de ces expressions, en déduire les valeurs de  $T_i$  et  $T_d$  utilisées pour le réglage du correcteur.**



En utilisant les mêmes valeurs des gains du correcteur PID qu'utilisées expérimentalement (Illustration 14) on obtient le résultat de l'illustration 13.

On peut donc utiliser ce modèle pour optimiser les valeurs des gains du correcteur.

On remarque sur l'illustration 15 la présence d'une saturation sur la valeur de l'écart pour limiter la plage de variation de tension entre 0 et 24 V.

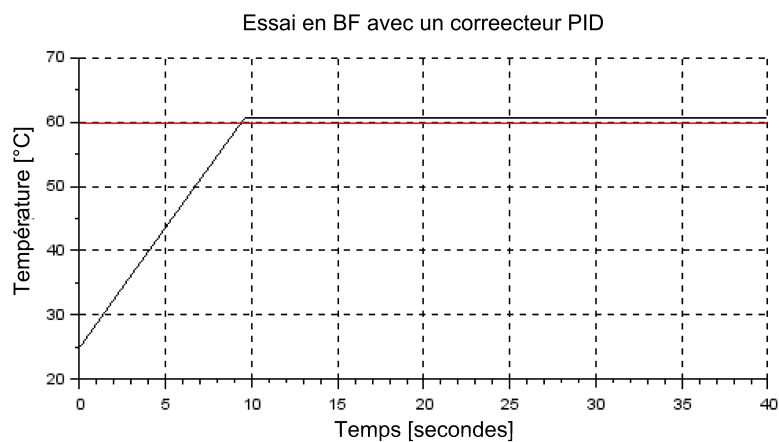


Illustration 13: Régulation avec correcteur PID (Simulation)

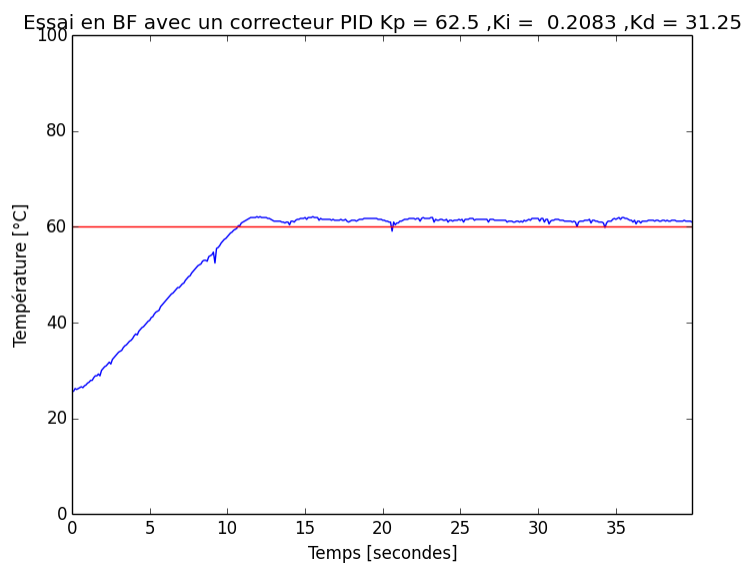


Illustration 14: Régulation avec un correcteur P.I.D. (Expérimentation)

**Conclure sur la validité de votre modèle.**



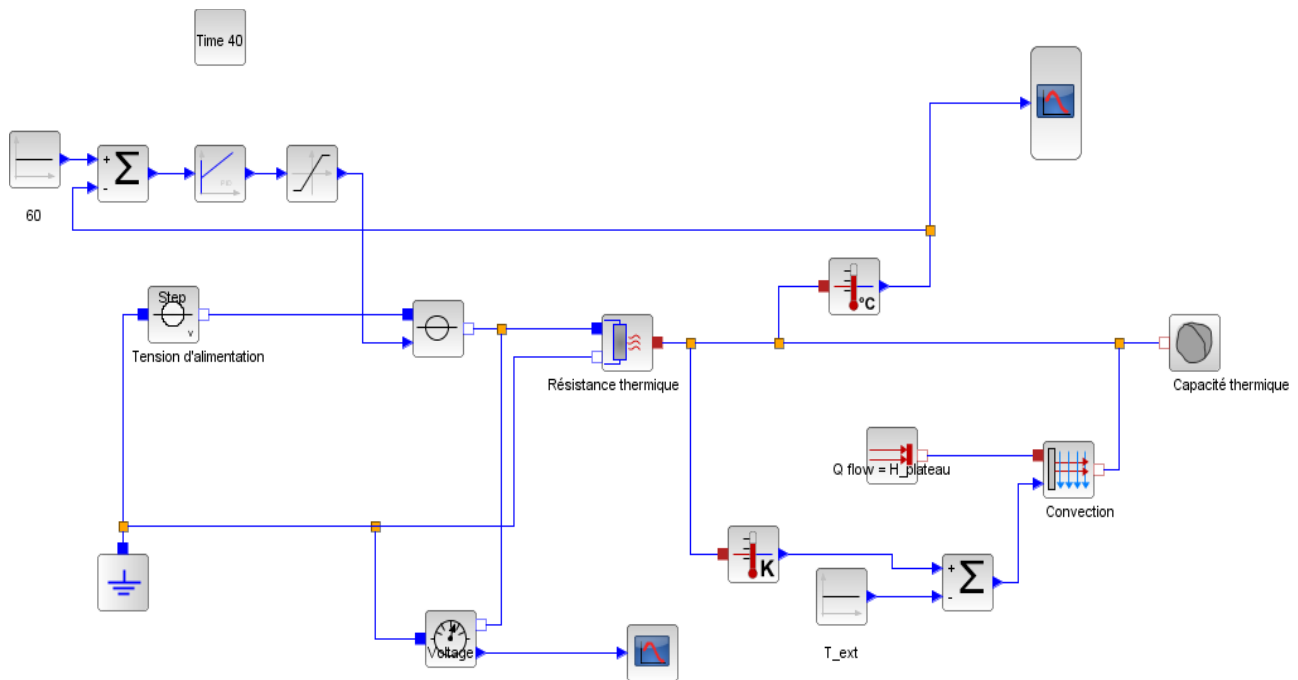


Illustration 15: Régulation avec correcteur PID (modélisation)

## Conclusion

Cet article a permis de mettre en évidence l'intérêt de la modélisation multiphysique dans le cas de la régulation de température d'un plateau chauffant d'une imprimante 3D. En effet, ce système complexe nécessite la compréhension de modèles qui s'avèrent finalement relativement simple à l'aide d'une représentation multiphysique. Néanmoins, l'obtention de résultats de calculs est beaucoup plus hasardeuse que pour un modèle dit causal (avec fonctions de transfert) car la modélisation multiphysique est beaucoup plus sensible aux paramètres numériques de simulation. Dans cet exemple, on peut remarquer que même si les conditions initiales sont non nulles, notre modèle converge.

Pour améliorer ce modèle, on pourrait ajouter des perturbations extérieures sur le modèle afin que les écarts entre les relevés expérimentaux et de simulation soient plus faibles.