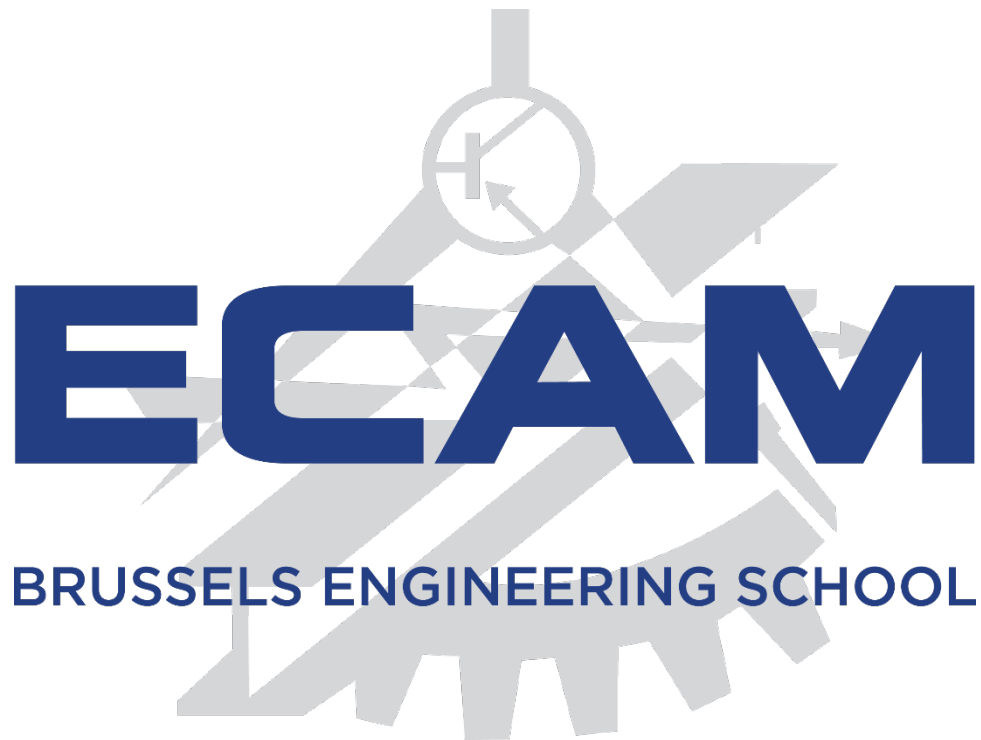


Rapport de laboratoire

Control Theory :



Plateforme : TCLab

Propos du laboratoire : Implémentation d'un PID avec FeedForward en Python

Enseignant : Franky De BRUYNE

Etudiants : Heni REKIK - Matthias LEONARD

Année académique : 2022-2023

Table des matières

I. INTRODUCTION	4
II. IDENTIFICATION DU PROCESS.....	6
1. IDENTIFICATION DE PV0	6
2. IDENTIFICATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT $P(s)$	6
<i>Valeurs des méthodes graphiques :</i>	<i>6</i>
3. COMPARAISON DES GRAPHIQUES ET PARAMÈTRES $P(s)$	7
4. COMPARAISON DES DIAGRAMMES DE BODE :	9
5. IDENTIFICATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT $D(s)$:	9
7. ETUDE APPROFONDIE DU POINT DE FONCTIONNEMENT SUR $P(s)$ ET $D(s)$:	11
<i>Etude sur MV :</i>	<i>11</i>
a. Gain statique :	12
b. Constante de temps :	12
c. Délais θ :	13
d. Observation générale :	13
<i>Etude sur DV :</i>	<i>13</i>
a. Gain statique :	13
b. Constante de temps :	14
c. Délais θ :	15
d. Observation générale :	15
III. MODÉLISATION, PID, FEEDFORWARD	16
1. PID :	16
<i>Théorie :</i>	<i>16</i>
<i>Observation du comportement PID en simulation :</i>	<i>17</i>
2. IMC TUNING :	17
3. FEEDFORWARD :	17
IV. IMPLÉMENTATION PID FEEDFORWARD EN SIMULATION ET EN RÉEL SUR LA PLATEFORME TCLAB :..	18
1. PARAMÈTRES :	18
2. MARGE DE GAIN ET MARGE DE PHASE :	18
3. COMPARAISON SIMULATION ET REEL :	19
<i>Boucle ouverte sans Feedfroward :</i>	<i>19</i>
a. Simulation :	19
b. Expérimentation réelle :	19
c. Observations :	19
<i>Boucle ouverte avec Feedfroward :</i>	<i>20</i>
a. Simulation :	20
b. Expérimentation réelle :	20
c. Observations :	20
<i>Boucle fermée sans Feedfroward :</i>	<i>21</i>
a. Simulation :	21
b. Expérimentation réelle :	21
c. Observations :	21
<i>Boucle fermée avec Feedfroward :</i>	<i>22</i>
a. Simulation :	22
b. Expérimentation réelle :	22
c. Observations :	23
V. CONCLUSION	24
VI. RÉFÉRENCES :	24

VIII.	ANNEXES :	25
a.	Détermination de $PV0$ pour $MV0=60\%$ et $DV0=30\%$	25
b.	Expérimentation pour $MV0=60\%$ et $DV0=30\%$ pour une modélisation de $MV0=50\%$ et $DV0=50\%$	25
c.	Réponse indicielle sur MV pour $MV0=50\%$ et $DV0=50\%$:.....	26

1. Introduction

L'objectif de ce laboratoire est d'appliquer la théorie du cours "Control theory and applications" à l'aide du kit Arduino de contrôle de température TCLab (temperature control lab). Nous allons devoir identifier la fonction de transfert $P(s)$ et $D(s)$ qui caractérise notre plateforme TCLab n°33 nous allons également modéliser, simuler, implémenter un contrôleur (PID) et un feedforward dans le but de réguler la température autour d'un point d'une température de consigne.

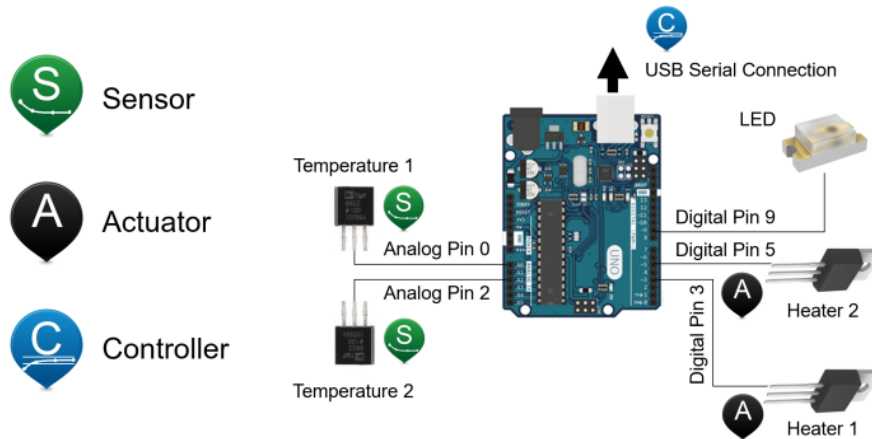


Figure 1

La plateforme TCLab est plateforme comportant deux thermomètre (T1, T2) et deux chauffage (HP1, HP2). Il s'agit d'une plateforme multivariable avec des processus non linéaires

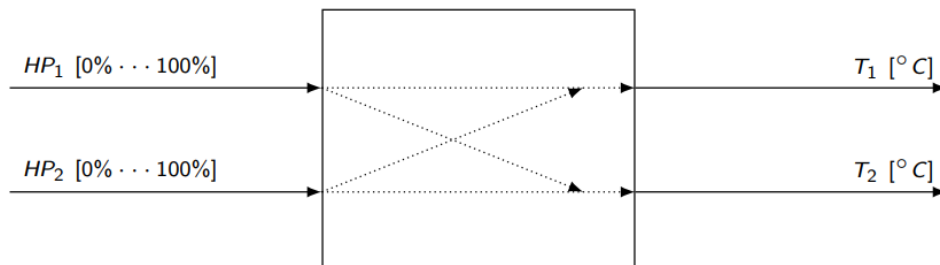


Figure 2

Pour simplifier notre modèle nous allons considérer HP1 comme MV (manipulated value), T1 comme PV (process value) et HP2 comme DV (Disturbance value) pour accentuer l'effet de la perturbation de DV une barre métallique a été ajoutée entre les deux chauffages. Pour l'étude de $P(s)$ et $D(s)$ nous travaillons autour du point de fonctionnement $MV=HP1=50\%$ et $DV=HP2=50\%$.

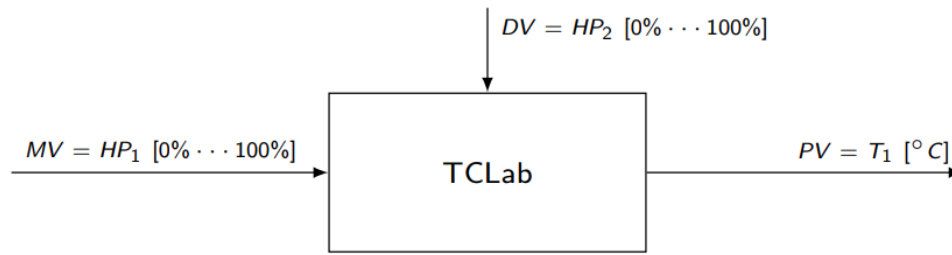


Figure 3

- Dans le but d'identifier $P(s)$ nous allons observer la réponse indicielle de MV sur PV quand le système est en régime (et en boucle ouverte), grâce à la réponse nous allons pouvoir identifier les paramètres K_p , les constantes de temps et le délais θ , nous pourrons également déterminer si notre processus est du premier ordre ou deuxième ordre.

Pour l'identification des paramètres nous allons utiliser plusieurs méthodes :

- Méthodes numériques :

Les méthodes numériques sont basées sur la minimisation de l'erreur à la courbe réel.

- Premier ordre (Identification_FOPDT.ipynb)
- Deuxième ordre (Identification_SOPDT.ipynb)

- Méthodes graphiques :

- Broida 1 et Broida 2
- Van der Grinten
- Strejc

Nous allons également réaliser une comparaison fréquentielle des modèles de $P(s)$ par la superposition des diagrammes de Bode.

- Dans le but d'identifier $D(s)$ Nous allons observer la réponse indicielle de DV sur PV : et identifier par les méthodes numériques
- Nous allons implémenter un régulateur PID et un feedforward pour suivre une consigne SP.
- Nous utiliserons la méthode IMC tuning pour optimiser notre PID.
- Nous ferons une étude de la marge de gain et marge de phase.
- Nous testerons nos modèles $\hat{P}(s)$ et $\hat{D}(s)$ et l'implémentation du PID et FeedForward en simulation et en réel.

Les points que nous allons essayer de développer sont mettre en avant les acquis du cours et faire preuve d'originalité en généralisant l'étude de $D(s)$ et $P(s)$ sur plusieurs points de fonctionnements.

II. Identification du process

1. Identification de PV0

Dans cette rubrique nous essayons de déterminer PV0 pour notre point de fonctionnement pour un MV=50% et un DV=50%, pour accélérer l'arrivée en régime de la plateforme nous donnons un profile de MVman de 100% sur les 60 premières secondes pour ensuite diminuer à 70% et au bout de 120 secondes nous passons à un MV=50%, Dans le même principe nous mettons la valeur DV à 70% pour les 80 premières secondes.

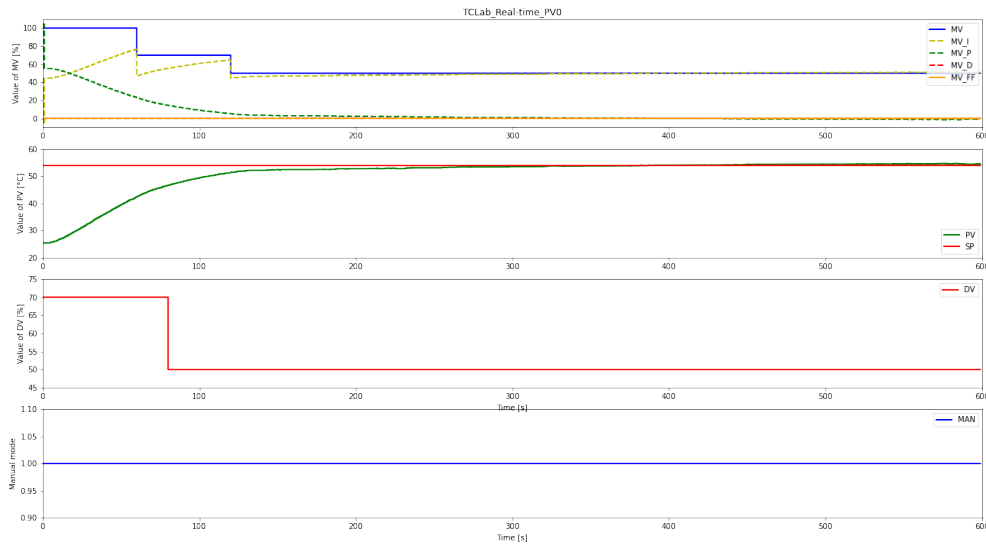


Figure 4 : PV0 MV50% et DV50% - TCLab_PV0_2023-03-30-15h32.png

Nous pouvons observer le régime est atteint en 300 secondes (Attention avec cette procédure de MV et DV sur cette plateforme précisément) pour une valeur PV0 = 54°C

2. Identification de la fonction de transfert P(s)

Afin d'identifier la fonction de transfert P(s) et identifier les caractéristiques du processus. Nous allons observer la réponse indicielle autour de MV0=50% avec un delta de 20%. Pour ce faire nous allons monter en régime avec une puissance de 30%, lorsque le régime est atteint la puissance de chauffe augmente à 70%. (Graphique de la réponse indicielle en annexe : Expérimentation pour MV0=60% et DV0=30% pour une modélisation de MV0=50% et DV0=50%).

Si notre fonction de transfert P(s) est du premier ordre la modélisation sera la suivante :

$$P(s) = \frac{Kp}{Ts + 1} e^{-\theta s}$$

Si nous sommes en présence d'un deuxième ordre :

$$P(s) = \frac{Kp}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\theta s}$$

Valeurs des méthodes graphiques :

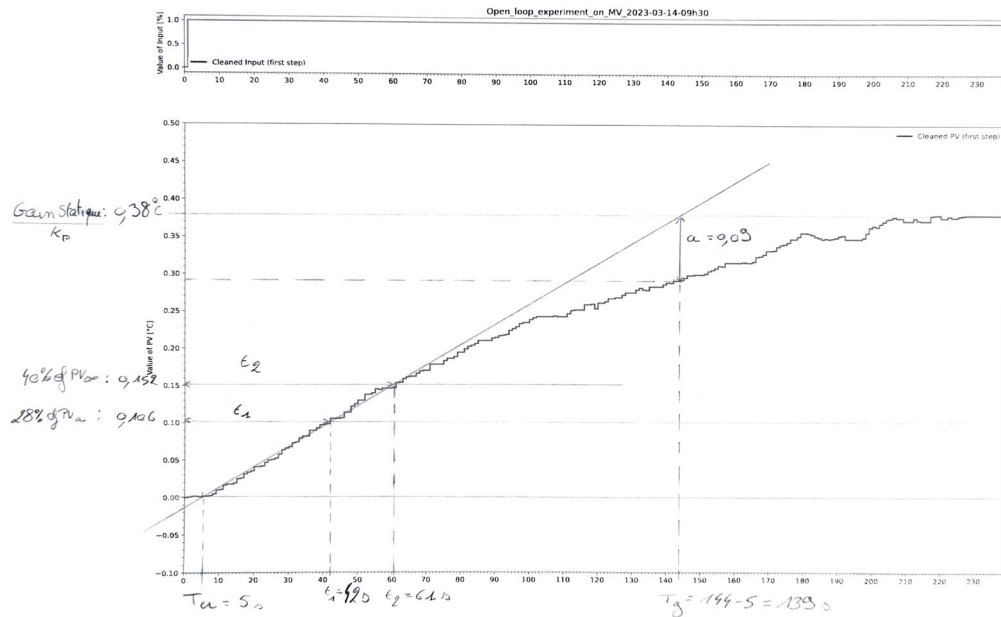


Figure 5 : Recherche graphique des caractéristiques d'une réponse indicielle

a	0,09
t1	42
t2	61
Tu	5
Tg	139
Kp	0,38

Tableau 1 : Caractéristiques graphiques

3. Comparaison des graphiques et paramètres $P(s)$

Méthodes	Kp	T1	T2	Thêta
Num FOPDT	0,57353289	199,416487	0	1,92824921
Num SOPDT	0,55335804	184,504684	1,78E-07	6,19336906
Broida 1	0,38	139	0	5
Broida 2	0,38	104,5	0	7,799999999999997
Strejc	0,38	139	0	5
Van der grinten	0,38	-29,713590739	84.35679536956	16,2221492501655

Tableau 2

Nous pouvons observer plusieurs comportements avec le tableau ci-dessus, la modélisation par la méthode numérique du second ordre semble mettre en évidence que nous sommes en présence d'un système du premier ordre car la valeur T2 est proche de 0.

Les méthodes numériques nous fournissent des valeur Kp relativement de même pour la valeur de T1.

Nous observons que les paramètres du modèle de Broida 1 et Strejc. Pour le modèle de Strejc nous avons identifié que nous étions en présence d'un système du premier ordre car T_u/T_g étant $= 0,036 < 0,10$ soit $a_n = 0$ et $b_n = 1$.

Nous pouvons également observer que la méthode de van der Grinten ne convient pas à notre modèle car nous sommes en présence d'une valeur négative pour T1.

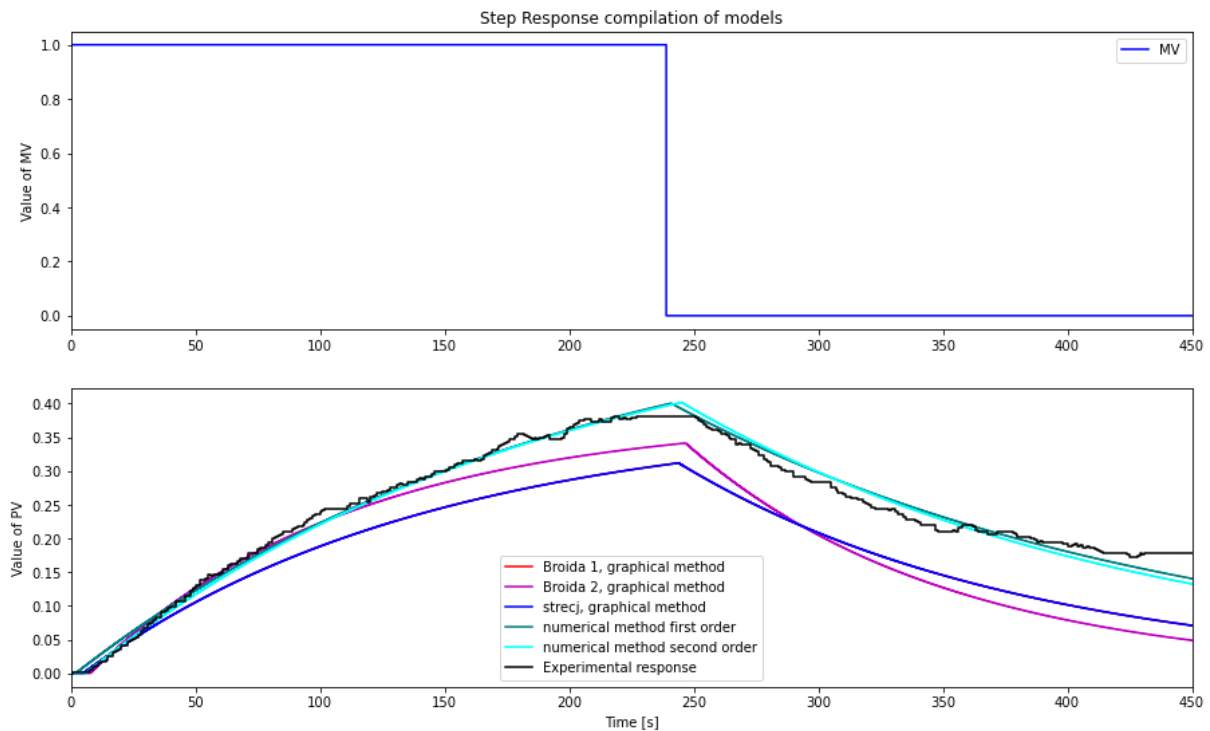


Figure 6: Compilation graphique de modélisations de $P(s)$ à une réponse indicielle

En comparant les graphiques des réponses indicielles modélisées par plusieurs méthodes nous pouvons constater que les méthodes qui collent le plus à la courbe réelle sont les deux méthodes graphiques sans pouvoir réellement les départager.

Pour ce qui est des courbes de Broida elles sont légèrement en dessous de notre courbe réelle. Néanmoins nous pouvons départager les courbes et la méthode Broida 2 semble mieux correspondre dans le cycle de chauffe et Broida 1 semble mieux correspondre pour le refroidissement.

Pour ce qui est de la courbe de Strecj celle-ci est superposée à la courbe de Broida 1 ceci est logique car nous avons les mêmes paramètres pour Broida 1 et Strecj.

4. Comparaison des diagrammes de Bode :

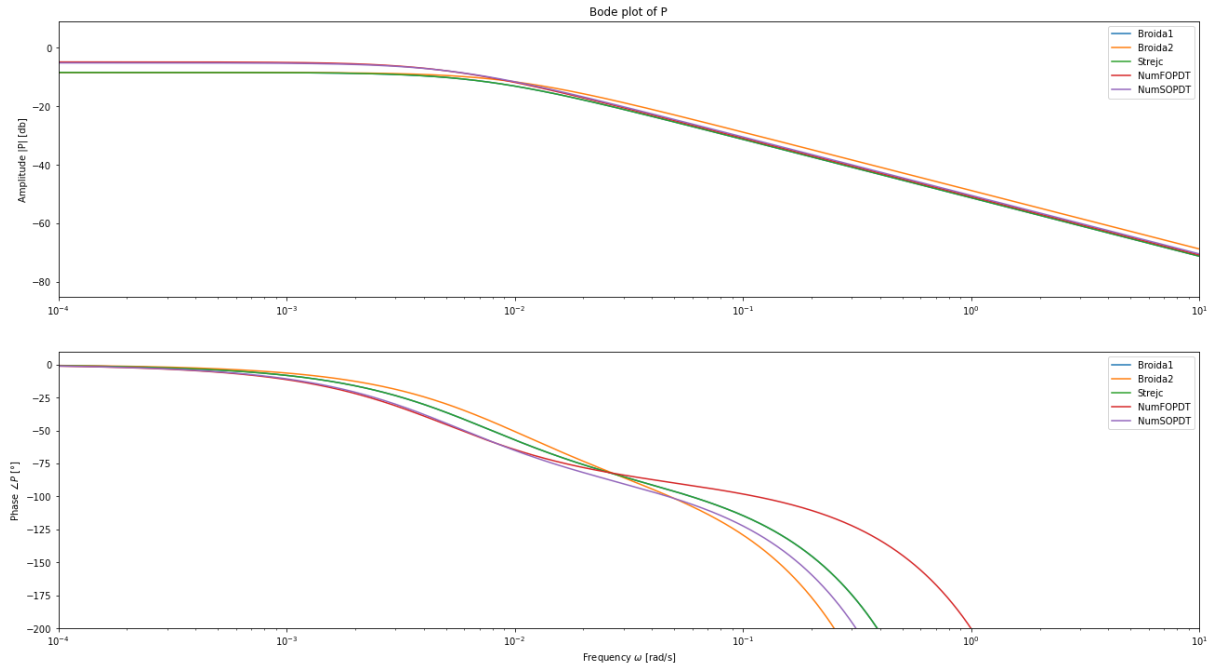


Figure 7

Le graphique ci-dessus nous montre les diagrammes de Bode pour les modélisation de Broda 1,2 , Strejc et les méthodes numérique du premier et deuxième ordre. Ce graphique nous permet de réaliser une étude fréquentielle.

Comme nous l'avons identifié précédemment nous n'avons que des modélisations de système de premier ordre le comportement est donc similaire entre les courbes d'atténuations du gain, la pente après la fréquence de coupure (-3Db) qui est autour de $1 \cdot 10^{-2}$ rad/s est de -20dB par décade.

5. Identification de la fonction de transfert $D(s)$:

Dans le but de réaliser une simulation de notre plateforme TCLab et également d'implémenter un FeedForward nous cherchons à estimer la fonction de transfert $D(s)$. Pour ce faire nous fixons une valeur de DV=50% et MV=50%, lorsque le régime est atteint nous étudions la réponse unitaire sur DV. Concrètement la valeur de DV passe de 50% à 70%, à l'aide des outils d'identification numérique fournis dans le laboratoire nous pouvons déterminer si le processus $D(s)$ est du premier ordre ou deuxième ordre, la valeur du gain statique, les constantes de temps et le délai.

	Kp	T1	T2	Thêta
1 ^{er} ordre	0,47934693	183,862815	X	18,3877017
2 ^{ème} ordre	0,47236627	172,259419	22,1508609	0,53371654

Tableau 3

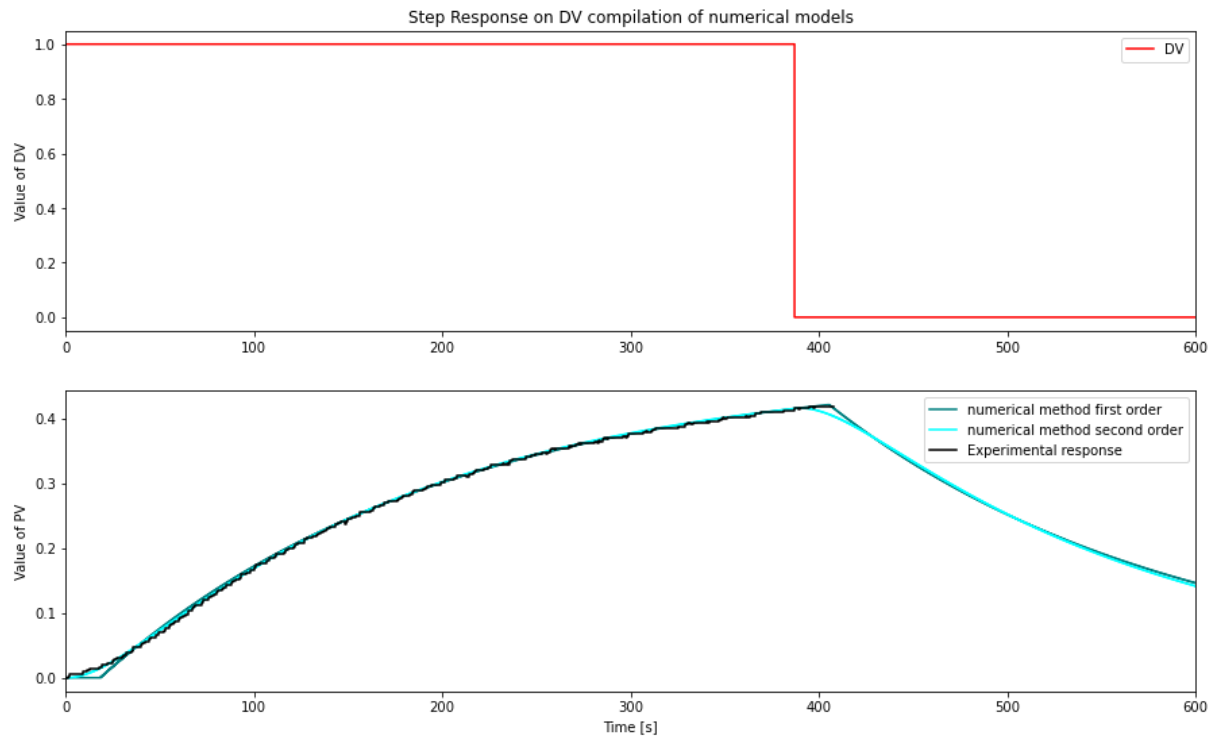


Figure 8

Nous pouvons conclure que nous sommes en présence d'un processus du deuxième ordre car il existe une constante de temps T_2 non négligeable et a fortiori la courbe du deuxième ordre se superpose parfaitement sur la courbe expérimentale dans le démarrage de la pente autour de 0 secondes.

Le fait d'identifier $D(s)$ va nous permettre de pouvoir implémenter un feedforward qui nous permettra de mieux anticiper la perturbation que nous allons induire à notre système.

7. Etude approfondie du point de fonctionnement sur $P(s)$ et $D(s)$:

Dans cette rubrique nous avons décidé d'étudier l'influence du point de fonctionnement MV (30%, 40%, 50%, 60%, 70%) sur le processus, nous avons également réalisé l'étude du point de fonctionnement avec plusieurs delta (20%, 30%, 40%). Nous avons également dans la même démarche réalisé l'étude du processus sur DV.

Les données des gains statique, des constantes de temps et les délais sont obtenues grâce aux méthodes d'identification numérique fournis dans le laboratoire (*Identification_FOPDT.ipynb* et *Identification_SOPDT.ipynb*).

Etude sur MV :

Pour l'étude sur MV nous avons réalisé l'expérience sous plusieurs points de fonctionnements et différents deltas, la valeur de DV est fixée à 50%.

MV [%]	30	40	50	60	70
Numerical method 1st order (Broida) - MV Delta 20% - DV 50%					
KP	1,10646902	0,59204744	0,57353289	0,56632535	0,58850858
Ts	329,184216	219,673542	199,416487	199,579828	205,614192
Thêta	0,18419198	0,99993621	1,92824921	0,9999684	1,97081096
Numerical method 2nd order - MV Delta 20% - DV 50%					
KP	erreur	0,55155461	0,55335804	0,52356776	0,52104096
T1	erreur	191,820109	184,504684	166,827157	162,484814
T2	erreur	0,04219191	1,78E-07	5,16E-02	6,10E-05
Thêta	erreur	5	6,19336906	7,20974318	10,1371906
Numerical method 1st order - MV Delta 30% - DV 50%					
KP	x	0,86020629	0,47307791	0,57768199	x
Ts	x	291,01243	187,181418	216,416644	x
Thêta	x	4,9995641	0,41654189	1,9999243	x
Numerical method 2nd order - MV Delta 30% - DV 50%					
KP	x	erreur	erreur	0,51147134	x
T1	x	erreur	erreur	174,273283	x
T2	x	erreur	erreur	4,88E-05	x
Thêta	x	erreur	erreur	7,99994068	x
Numerical method 1st order - MV Delta 40% - DV 50%					
KP	x	x	0,48307571	x	x
Ts	x	x	189,625947	x	x
Thêta	x	x	0,80188104	x	x
Numerical method 2nd order - MV Delta 40% - DV 50%					
KP	x	x	0,48305225	x	x
T1	x	x	189,610899	x	x
T2	x	x	4,10E-05	x	x
Thêta	x	x	0,41252541	x	x

Tableau 4 : Estimation par méthodes numérique de $P(s)$ sur différents points de fonctionnements

a. Gain statique :

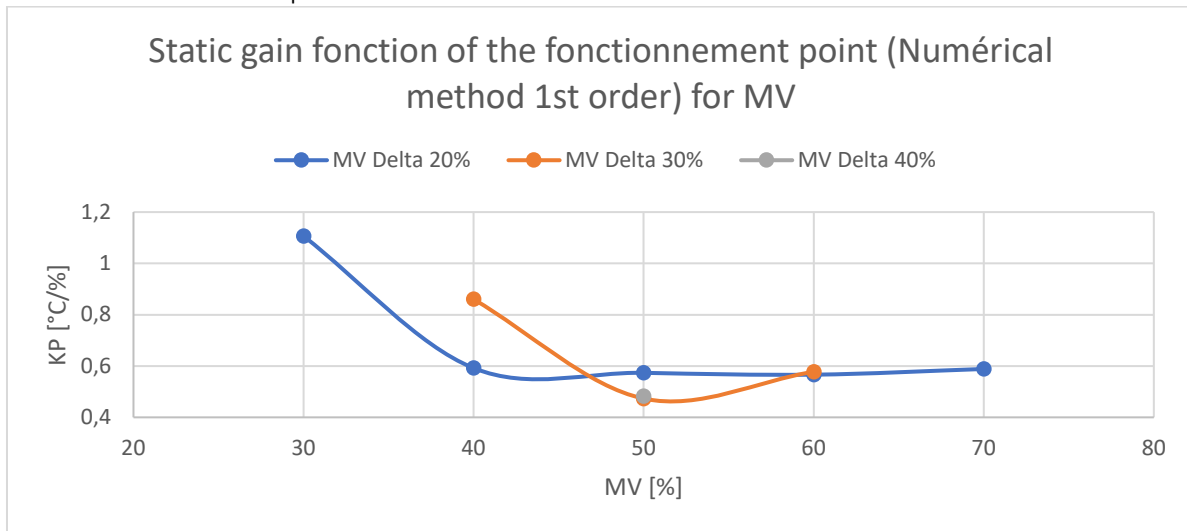


Figure 9

Le graphique ci-dessus montre les valeurs de K_p sous plusieurs points de fonctionnement de MV, nous pouvons observer que le point de fonctionnement du processus n'a que peu d'influence sur la valeur de K_p , les seuls points qui semblent sortir d'une valeur de K_p autour de $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$ sont les points $MV=40\%$ avec $\text{delta}=30\%$ ($K_p=1,1$) et le point $MV=30\%$ avec $\text{delta}=20\%$ ($K_p=0,86$). Le point commun entre les deux K_p est que pour être déterminé ils ont inclus le point de fonctionnement $MV=10\%$ pour être calculé. Nous pouvons donc estimer que la valeur K_p autour de $MV=10\%$ est plus grande. Ceci met en exergue le principe de non linéarité du processus dans des MV inférieur ou égale à 10% .

b. Constante de temps :

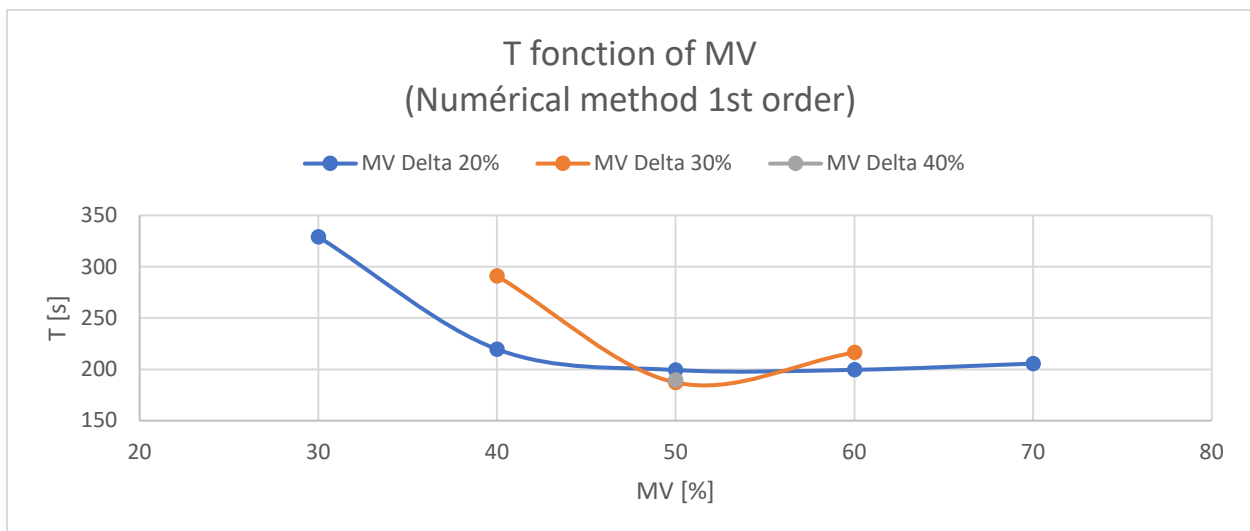


Figure 10

Le graphique ci-dessus montre les constantes de temps obtenues par l'identification numérique d'ordre 1 sous plusieurs points de fonctionnement de MV. Nous remarquons la similitude des courbes avec celles de K_p nous tirons les mêmes conclusions, les constantes de temps sont similaires sauf lorsqu'elles incluent le point $MV=10\%$.

c. Délais thêta

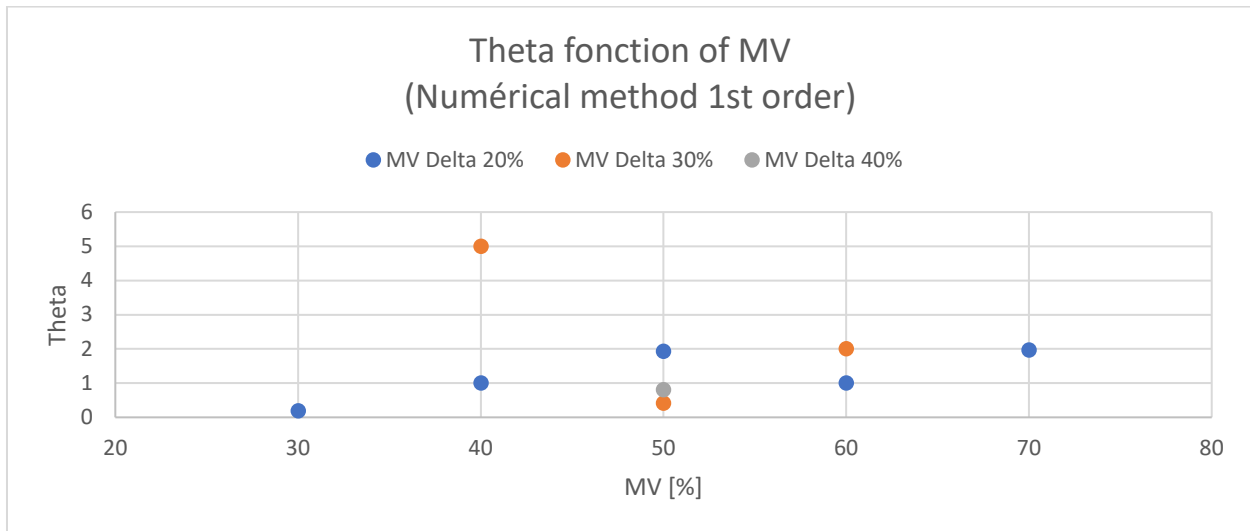


Figure 11

Le graphique ci-dessus montre les délais thêta obtenus par l'identification numérique d'ordre 1 sous plusieurs points de fonctionnement. Nous n'observons pas de phénomène très marqué à l'observation de ces données. Nous ne nous prononcerons pas sur des hypothèses incertaines.

d. Observation générale :

Nous pouvons conclure que comportement de la plateforme à un comportement similaire au-dessus 10% de MV, ceci implique que dans l'estimation du processus de $P(s)$ le point de fonctionnement n'influe pas les valeurs de la fonction de transfert et par réciprocity le comportement de la plateforme sera similaire si nous travaillons avec des $MV > 10\%$.

L'étude que nous venons de réaliser sur MV a parcouru une plage de MV allant de 10% à 90% de MV et comme les K_p semblent similaires sur pour la plage de $MV =]10\% ; 90\%]$ nous pouvons appréhender le comportement sur cette plage de MV par un modèle linéaire.

Etude sur DV :

Pour l'étude sur DV nous nous sommes basé sur un point de fonctionnement de $MV = 50\%$ et nous avons réalisé l'étude d'une réponse unitaire sur plusieurs points de fonctionnement de DV avec un delta de 20%.

DV [%]	30	40	50	60	70
Numerical method 1st order (Broida) - DV Delta 20% - MV 50%					
Kd	0,3938483	0,48816891	0,47934693	0,38140121	0,46089386
T	188,313996	227,736207	183,862815	106,140558	219,666225
Theta	19,0987135	17,0000138	18,3877017	16,1848684	13,1677206
Numerical method 2nd order - DV Delta 20% - MV 50%					
Kd	0,32995935	0,40629367	0,47236627	0,37340705	0,45821383
T1	125,595657	147,818872	172,259419	96,079719	215,172144
T2	23,2371327	30,95561	22,1508609	1,28E+01	1,22E+01
Theta	7,84895443	1,00001626	0,53371654	6,61346629	2,45124843

Tableau 5

a. Gain statique :

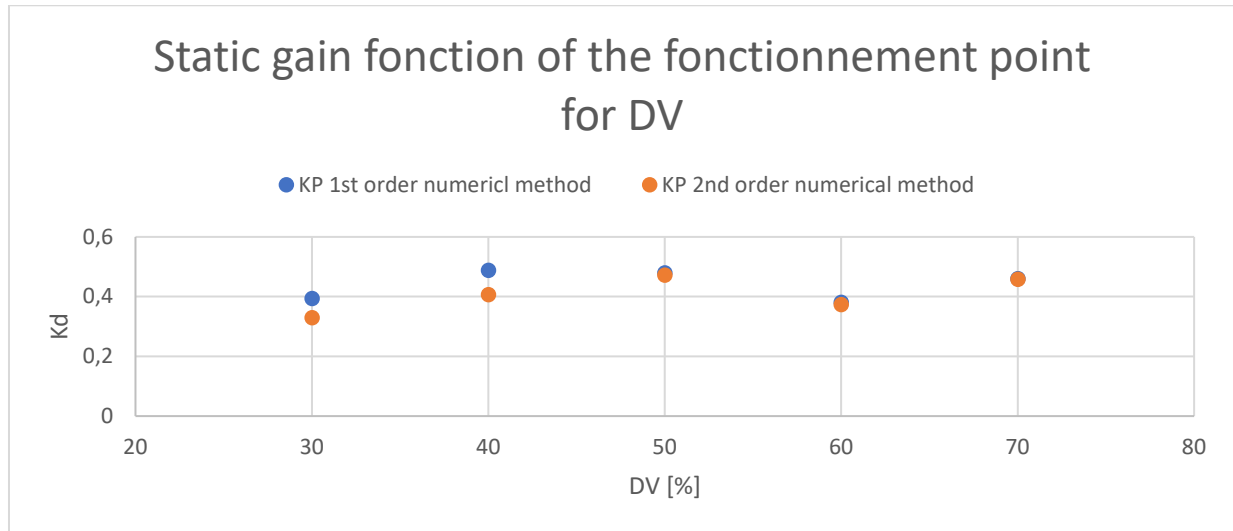


Figure 12

Le graphique ci-dessus montre les valeurs de K_d sous plusieurs points de fonctionnement de DV. Nous pouvons observer que les valeurs de K_d sont similaires sur les points de fonctionnement testés.

b. Constante de temps :

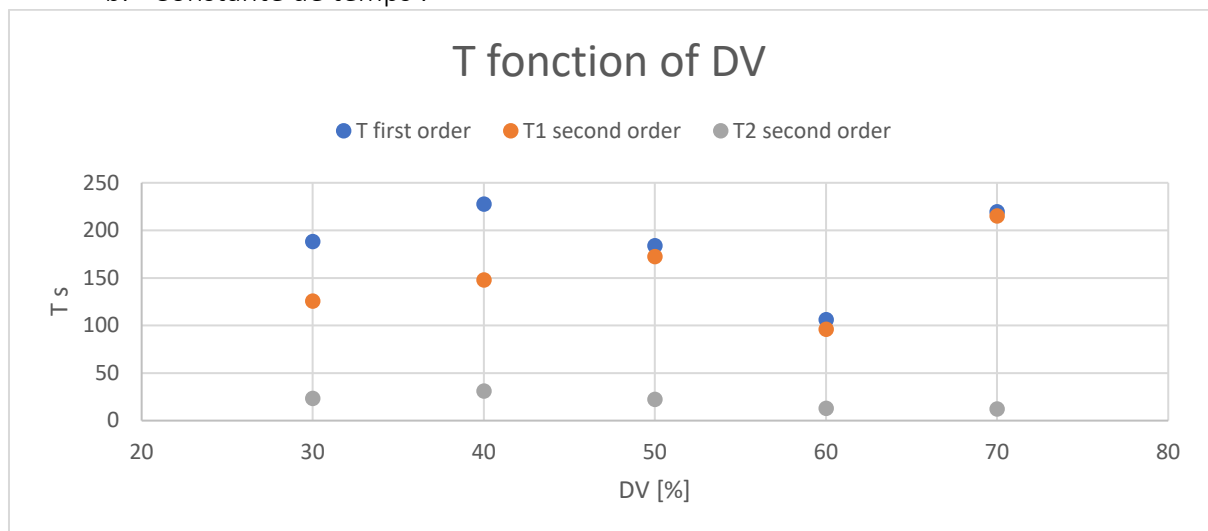


Figure 13

Le graphique ci-dessus montre les constantes de temps sous plusieurs points de fonctionnement de DV. Nous avons précédemment identifié le processus DV comme étant du deuxième ordre. Nous observons que les constantes de temps pour la série du deuxième ordre ne permet pas d'identifier une tendance en fonction du point de fonctionnement. De plus les constantes de temps varient très peu entre elles (delta max pour $T_1=76s$ et $T_2=18s$). De ces données nous tirons la conclusion que le point de fonctionnement de DV n'influence pas les constantes de temps.

c. Délais θ :

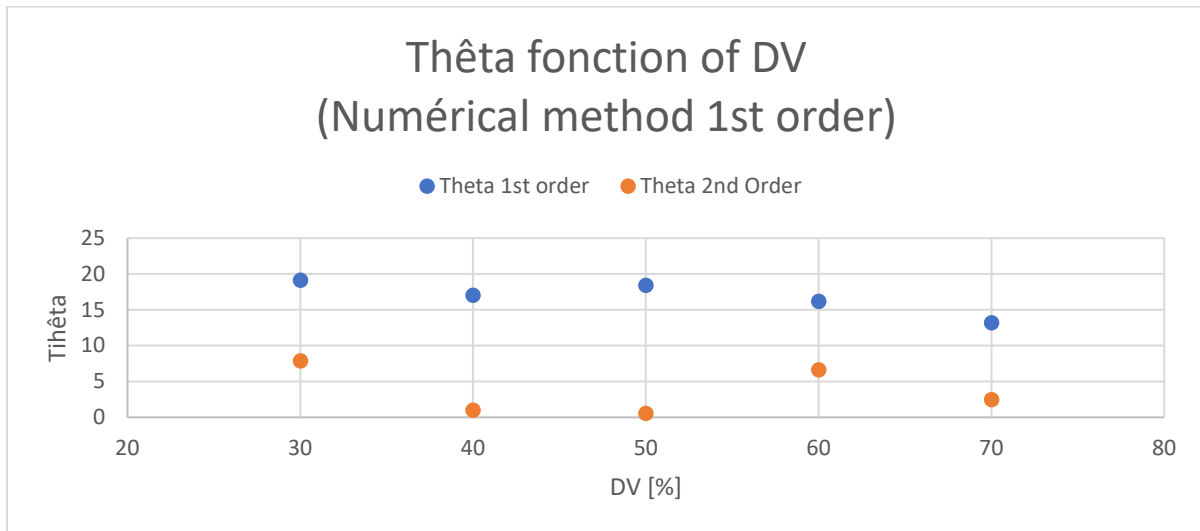


Figure 14

Le graphique ci-dessus montre les délais θ obtenus par identification numérique d'ordre 1 et d'ordre 2 sous plusieurs points de fonctionnement DV. Nous observons que les valeurs de θ ne varient pas (delta θ max 2^{ème} deuxième ordre = 7, 3) de plus nous n'observons pas de tendance spécifique avec le changement de température. Nous concluons que θ DV ne dépend pas du point de fonctionnement pour les DV allant de 30% à 70%.

d. Observation générale :

Nous venons de voir que les K_p , les constantes de temps et θ ne varient pas significativement entre les points de fonctionnement de DV, nous concluons que le processus $D(s)$ aura le même comportement sous tous les points de fonctionnement.

Nous avons estimé en observant K_p et K_d que nous pouvions appréhender par des modèles linéaires sur des plages de chauffe allant de]10% ; 90%] pour MV et [10% ; 90%] pour DV. Pour montrer de manière plus directe nos propos nous devrions réaliser des graphiques de PV0 en fonction MV. Pour montrer l'indépendance de DV sur la plage linéaire de MV nous devrions réaliser les graphiques sous plusieurs DV0 (20,30,40,50%...). Ces graphiques devraient être réalisés réciproquement pour DV soit PV0 en fonction de DV.

Malheureusement nous n'avons pas suffisamment de temps pour réaliser ces graphiques néanmoins, Pour illustrer nos conclusions sur le principe de similarité du comportement de MV et DV (pour des points de fonctionnement MV >10 % et DV > 10%) nous avons réalisé une expérimentation TCLab pour MV0= 60% et DV0= 30% (PV0=50°C) en gardant les paramètres K_p , K_d , T_{1p} , T_{1d} , T_{2p} et T_{2d} pour MV=50% et DV=50%. Nous observons que le fonctionnement du FeedForward fonctionne parfaitement et de même pour le comportement général du PID. (Document en Annexe)

III. Modélisation, PID, FeedForward

1. PID :

Théorie :

Dans ce laboratoire nous cherchons à implémenter un contrôleur PID en parallèle qui est le PID le plus courant en industrie

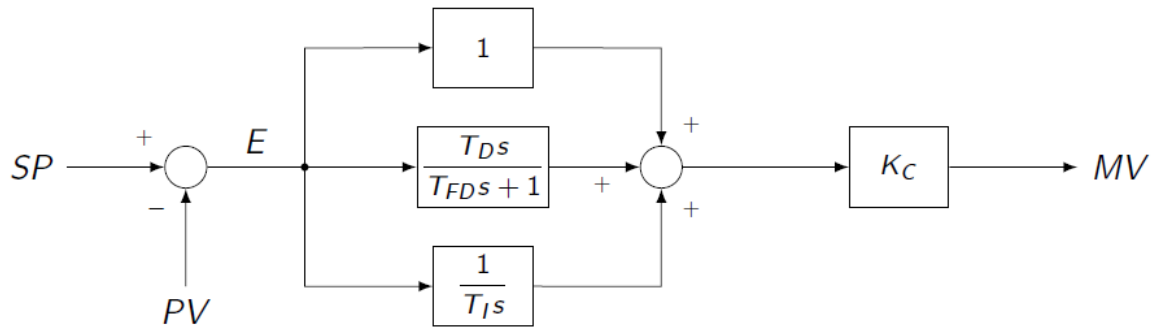


Figure 15 : PID parallèle

La relation d'un MV pour un PID en parallèle dans le domaine de Laplace est donc le suivant :

$$MV = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T_{FD} s + 1} \right) E$$

Nous pouvons identifier plusieurs paramètres :

K_C qui est le gain statique de notre PID et E l'erreur entre SP et PV . Nous pouvons identifier d'autres éléments actifs comme :

- Partie proportionnelle : $\left(1 + \right)$ Il s'agit du K_C multiplié par l'erreur. L'action proportionnelle agit comme si elle regardait le moment présent.
- Intégrale : $+\frac{1}{T_I s} +$ La partie intégrale permet d'accumuler les erreurs précédentes et augmente la valeur de MV . Le paramètre T_I permet de modifier la pente de l'action intégrale. La partie intégrale agit comme si elle regardait le passé.
- Dérivé : $+\frac{T_D s}{T_{FD} s + 1}$ La partie dérivée est très sensible au bruit qui pourrait se produire, il est donc nécessaire d'atténuer l'influence du bruit c'est pourquoi nous divisons par le terme $(T_{fd} + 1)$. T_{fd} est le dérivé filtré, celle-ci est obtenue en multipliant T_d par un coefficient α $[0,2;0,9]$ plus α est grand plus la dérivée est filtrée et moins l'action dérivée aura d'influence sur la régulation. L'action dérivée agit comme si elle anticipait l'avenir.

Attention dans l'implémentation d'un contrôleur nous ne sommes pas obligés d'intégrer une partie dérivée, dans la plupart des cas une simple implémentation d'un régulateur PI est suffisante.

Pour régler un PID il est nécessaire de respecter des règles, il faut s'occuper dans un premier temps de régler l'action PI en fixant le K_C puis le T_I . Après ces opérations nous pouvons nous occuper de l'action dérivée et fixer α , le rapport T_d/T_i doit être inférieur à 0,25.

Observation du comportement PID en simulation :

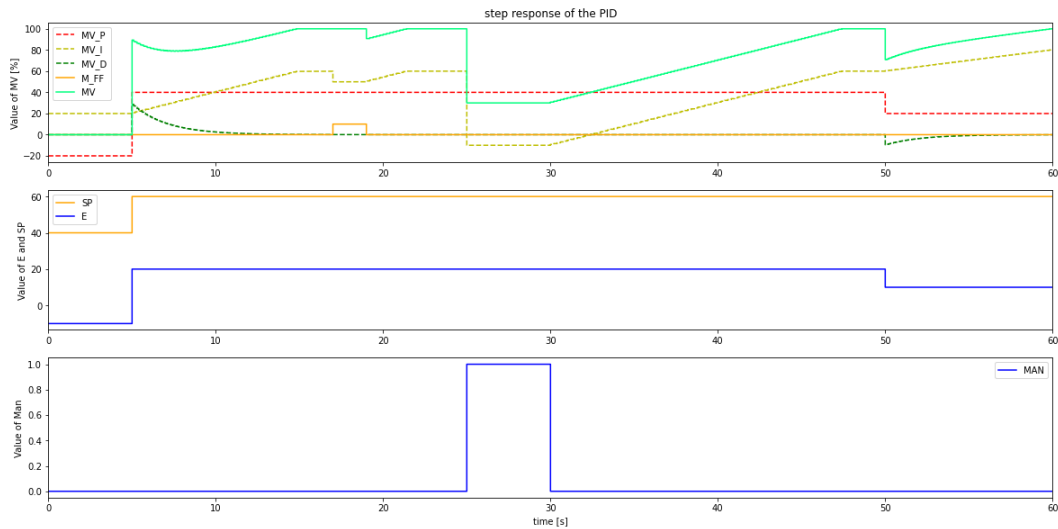


Figure 16

Dans le graphique ci-dessus qui est une simulation du fonctionnement de notre PID, nous pouvons observer les différentes actions MV_P , MV_I , MV_D et MV_{FF} qui agissent sur MV . Nous observons que MV reste bien entre $[0\% ; 100\%]$, nous pouvons également observer que lorsque nous sommes en saturation l'action intégrale ne s'emballe pas et opère un reste notamment lorsque l'action du feedforward agit.

Le passage entre le mode Automatique et manuel nous observons un reste de MV_I et lors du passage du mode manuel à automatique nous n'observons pas d'emballement de l'action intégrale. Nous en concluons que l'anti wind-up est correctement implémenté.

2. IMC Tuning :

La méthode IMC Tuning est utilisé pour les systèmes qui se stabilise autour d'un point de fonctionnement en régime. Cette fonction permet de trouver les paramètres optimaux K_c , T_i , T_d pour un régulateur PID. Dans cette méthode d'optimisation des paramètres il est possible de jouer sur un paramètre gamme qui agit sur l'agressivité du contrôleur en agissant sur $\tau_c = \gamma T_{OPL}$.

Le paramètre gamma doit être compris entre $[0,2 ; 0,9]$ il s'agit la d'une règle de bonne pratique.

3. Feedforward :

Dans ce laboratoire nous venons d'implémenter un contrôleur, nous cherchons maintenant à anticiper l'erreur DV que nous allons induire par le deuxième chauffage de la carte, nous avons précédemment identifier une estimé de $D(s)$.

Nous avons vu en laboratoire que : $-\frac{\hat{D}}{\hat{P}} = -\frac{K_d (T_{1p}s+1)(T_{2p}s+1)}{K_p (T_{1d}s+1)(T_{2d}s+1)} e^{-\theta_{FFs}}$

$\frac{(T_{1p}s+1)}{(T_{1d}s+1)}$: Lead-Lag 1

$\frac{(T_{2p}s+1)}{(T_{2d}s+1)}$: Lead-Lag 2

Pour implémenter notre feedforward nous avons donc utilisé le rapport K_d/K_p puis deux lead-lag et enfin le délai.

IV. Implémentation PID Feedforward en simulation et en réel sur la plateforme TCLab :

1. Paramètres :

Nous avons choisi arbitrairement de choisir comme coefficient $\alpha = 0,9$ ce qui filtre grandement la dérivé et réduit l'importance de MV_I, nous avons choisi pour la méthode IMC tuning $\gamma = 0,9$ ce qui permet d'avoir un comportement du PID peu agressif.

La méthode IMC Tuning nous donne les paramètres :

$K_c : 1.93574448737583$

$T_I : 184.5046842733446$

$T_D : 1.78243605578892e-07$

Critiques : La valeur de T_d est proche de 0, cependant nous sommes nous respectons bien la règle que $T_d/T_i < 0,25$.

Nous aurions pu descendre la valeur de γ comme celle de α pour rendre l'action le contrôleur plus agressif et plus réactif face à l'action dérivé. Dans les conditions actuels l'action dérivé est inexistante.

2. Marge de gain et marge de phase :

Pour chaque implémentation du PID il est intéressant de faire une étude sur le diagramme de Bode de $L(s)=P(s)*C(s)$, nous pouvons voir ainsi voir le comportement de la plateforme dans le domaine fréquentiel.

Il nous est également possible de déterminer la marge de gain et la marge de phase qui illustrent respectivement la robustesse au changement de gain et au déphasage.

Il est important de noter que pour chaque changement de γ et α il est nécessaire de recalculer la marge de gain et marge de phase car nous ne sommes plus en présence des mêmes paramètres de $C(s)$.

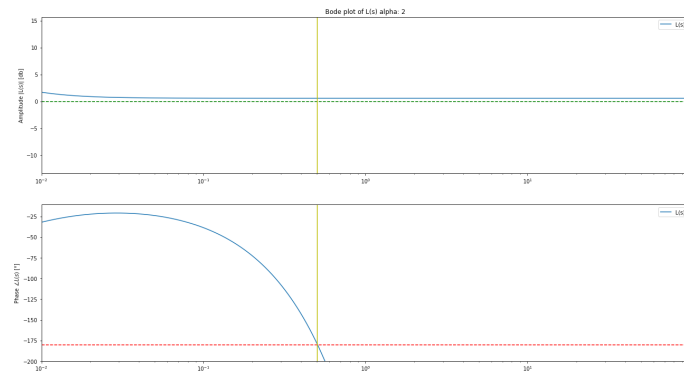


Figure 17

indiceGain: None

indicePhase: 4259

Gain margin : 0.5975851446988621 dB at 0.5050918222052984 rad/s

Error in the frequency phase computation

Malheureusement comme nous pouvons le constater nous avons un problème dans l'implémentation de notre diagramme de Bode de $L(s)$, nous nous sommes basé sur le fait que $L(s)=P(s)*C(s)$

$$\text{Soit } L(s) = \frac{K_p * K_c}{(T_1 * s + 1) * (T_2 * s + 1)} * \left(1 + \frac{1}{T_i * s} + \frac{T_d * s}{T_f * s + 1} \right).$$

3. Comparaison Simulation et Réel :

Boucle ouverte sans Feedforward :

Dans ce scénario nous sommes en présence d'une boucle ouverte sans feedforward ce qui signifie que le contrôleur n'a aucune information sur la sortie PV, le PID ne peut donc pas fonctionner, de même pour le feedforward celui-ci n'est pas activé nous n'allons donc pas anticiper la variation de DV. Le système va donc se stabiliser autour du point de fonctionnement PV0 en régime en fluctuant en fonction de DV.

a. Simulation :

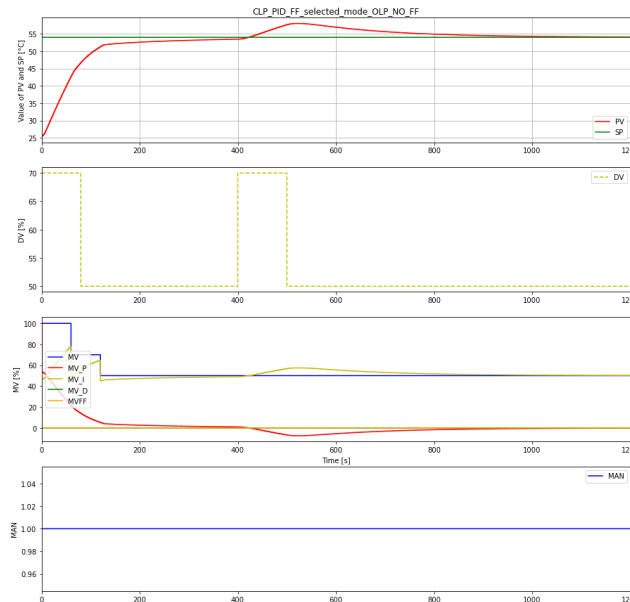


Figure 18

b. Expérimentation réelle :

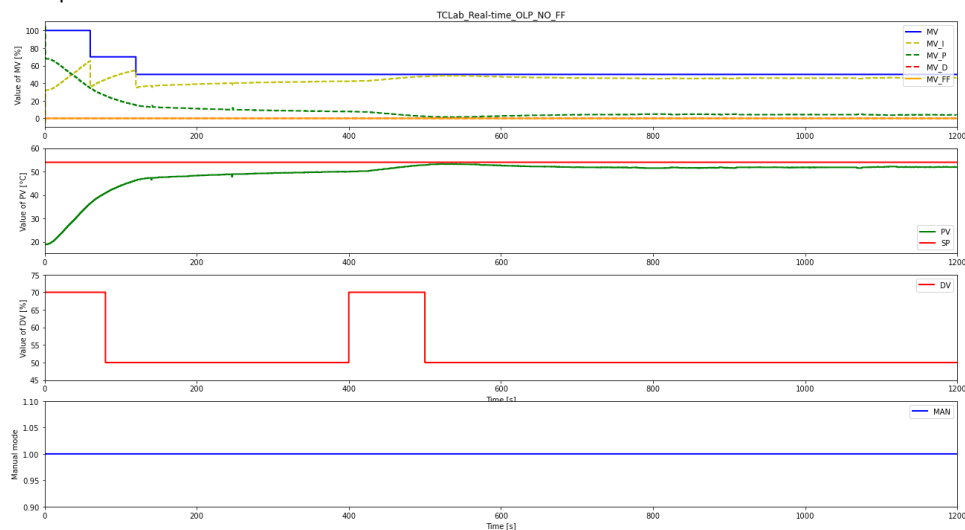


Figure 19

c. Observations :

Nous pouvons observer que dans la simulation correspond parfaitement aux attentes. En régime le système se stabilise autour du point de fonctionnement PV0 et fluctue en fonction de DV.

Pour le fonctionnement en réel malheureusement le système n'a pas atteint parfaitement le régime avant que la perturbation s'effectue. Néanmoins nous pouvons observer qu'après la perturbation PV diminue sans que MV essaie de compenser cette variation. PV se stabilise bien autour de PV0 et fluctue en fonction de DV.

Boucle ouverte avec Feedforward :

Dans ce scénario nous sommes en présence d'une boucle ouverte avec feedforward ce qui signifie que le contrôleur n'a aucune information sur la sortie PV, le PID ne peut donc pas fonctionner. Néanmoins le feedforward est activé nous il va donc anticiper la variation de DV. Le système va donc se stabiliser autour du point de fonctionnement PV0 sans fluctuer en fonction de DV.

a. Simulation :

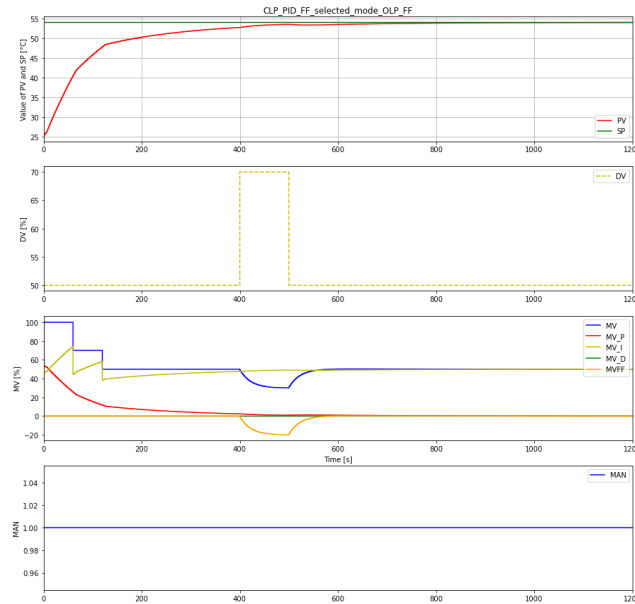


Figure 20

b. Expérimentation réelle :

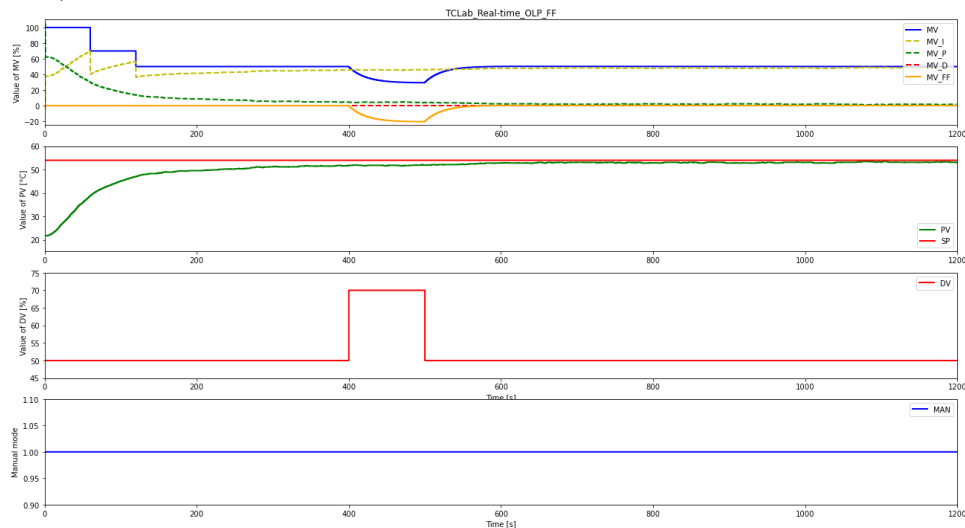


Figure 21

c. Observations :

Nous pouvons observer que dans la simulation correspond parfaitement aux attentes. En régime le système se stabilise autour du point de fonctionnement PV0 et ne fluctue pas en fonction de DV.

Pour le fonctionnement en réel nous pouvons observer que la température PV est insensible à la perturbation DV, nous pouvons également voir que MV compense la perturbation par l'influence de MV_FF. Nous noterons que PV se stabilise bien autour de PV0 et ne fluctue pas en fonction de DV.

Boucle fermée sans Feedforward :

Dans ce scénario nous sommes en présence d'une boucle fermée sans feedforward ce qui signifie que le contrôleur reçoit l'information de la valeur de PV il est ainsi possible de calculer l'erreur E, le PID peut fonctionner parfaitement. Néanmoins le feedforward n'est pas activé il n'y a donc pas d'anticipation sur la variation de DV. Le système va donc essayer d'adapter MV pour s'adapter à la consigne sans que MV_FF joue un rôle, rejoindre la température de consigne prendra donc plus de temps.

a. Simulation :

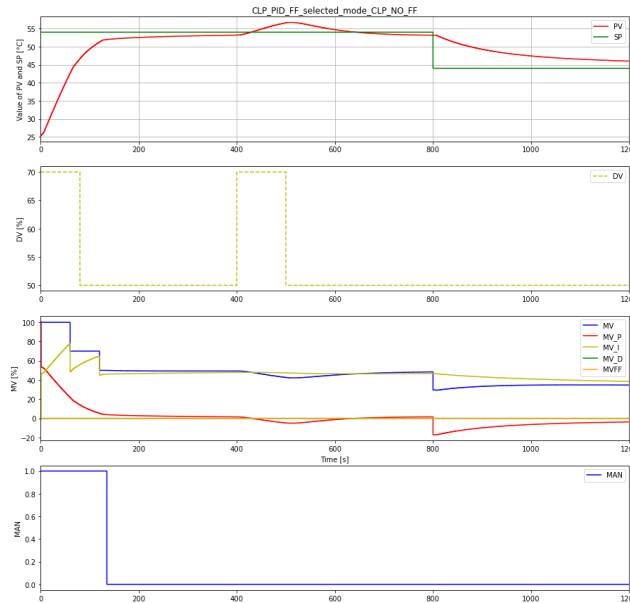


Figure 22

b. Expérimentation réelle :

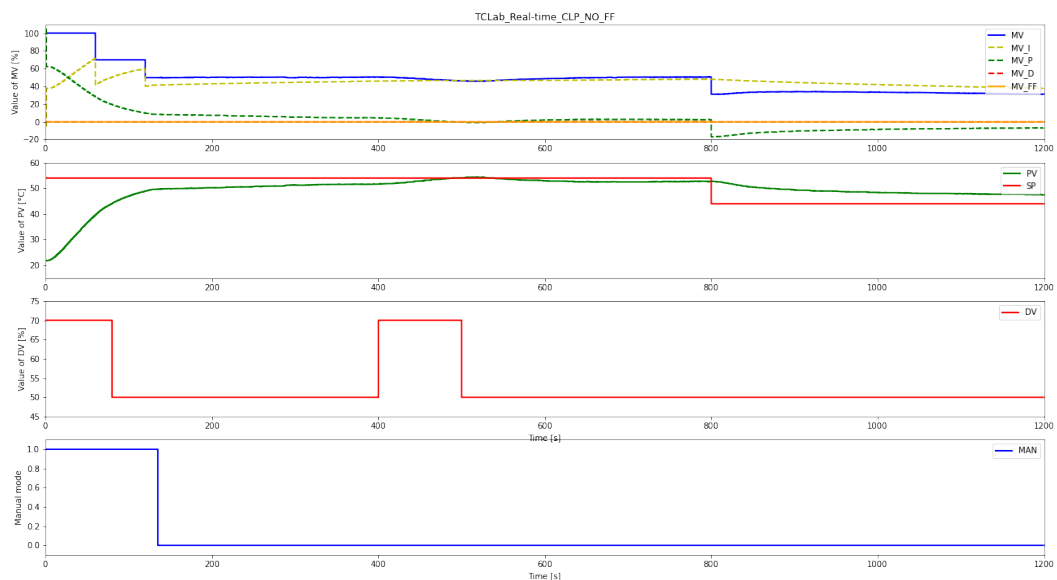


Figure 23

c. Observations :

Nous pouvons observer que dans la simulation correspond parfaitement aux attentes. La perturbation n'est pas compensée par l'action MV_FF et est prise par l'action MV_P nous notons que l'action MV_D qui est sensé anticiper sur l'erreur ne s'applique pas, comme expliqué précédemment ceci est due au fait que le dérivé est fortement filtré et en plus la valeur Td est quasiment nulle. De plus lors d'un changement de consigne PV tend à rejoindre la nouvelle consigne.

Pour le fonctionnement en réel nous pouvons observer que le comportement correspond à la simulation en moins prononcé, nous tirons les mêmes conclusions que pour la simulation.

Pour rendre notre PID plus agressif nous arions due diminuer la valeur gamma dans IMC tuning nous aurions ainsi rejoint plus rapidement la nouvelle température de consigne.

Boucle fermée avec Feedforward :

Dans ce scénario nous sommes en présence d'une boucle fermée avec feedforward ce qui signifie que le contrôleur reçoit l'information de la valeur de PV il est ainsi possible de calculer l'erreur E, le PID peut fonctionner parfaitement. De plus le feedforward est activé il y a donc une anticipation sur la variation de DV. Le système va donc essayer d'adapter MV pour s'adapter à la consigne tout en prenant en compte le rôle de MV_FF. PV va donc rejoindre la température de consigne et ne subir d'influence de la part de DV.

a. Simulation :

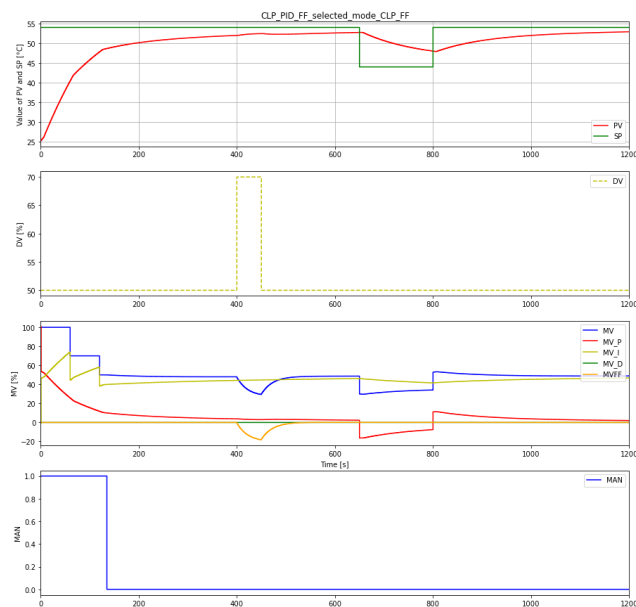


Figure 24

b. Expérimentation réelle :

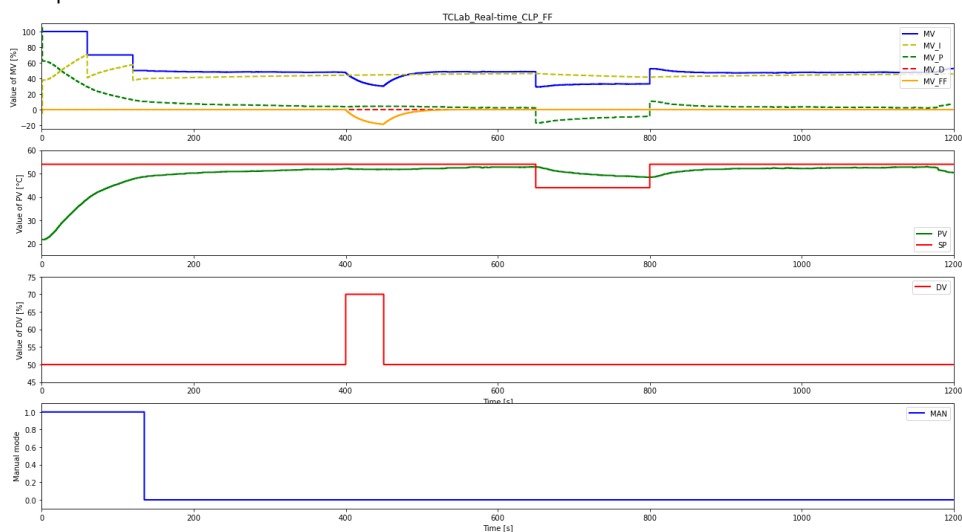


Figure 25

c. Observations :

Nous pouvons observer que dans la simulation correspond parfaitement aux attentes. La perturbation est compensée par l'action MV_FF. Pour ce qui est du changement de consigne nous observons que le temps nécessaire pour rejoindre la température de consigne est extrêmement long, pour rendre le système plus rapide nous pourrions diminuer la valeur Gamma dans ICM tuning et aux vues de la marge de gain et marge de phase nous pourrions donner plus ou moins d'importance à la partie dérivative en diminuant ou augmentant la valeur de alpha, bien évidemment par cette action $L(s)$ subira des changements.

Pour le fonctionnement en réel nous pouvons observer que le comportement correspond à la simulation et le changement de consigne est repris pas l'action proportionnelle.

Dans l'état actuel nous avons probablement une marge de gain trop grande ce qui expliquera que nous rejoignons difficilement la température de consigne.

V. Conclusion

Dans ce laboratoire nous avons pu implémenter un PID et un Feedforward sur la plateforme TCLab. Pour ce faire nous avons dû identifier par plusieurs méthodes graphique et numérique, la fonction de transfert qui caractérise le processus $P(s)$, de même pour la perturbation $D(s)$. Nous avons observé que notre processus est $P(s)$ peut se caractériser par une fonction du premier ordre, pour ce qui est de $D(s)$ elle peut être identifiée par une fonction du deuxième ordre. Nous avons également poussé l'étude sur $P(s)$ et $D(s)$ sous plusieurs points de fonctionnement, nous en avons conclu que les processus $P(s)$ et $D(s)$ peuvent être appréhender par un modèle linéaire sur une plage $]10\% ; 90\%]$.

Nous avons pu mettre en application la théorie vue en cours et observer les influences des paramètres sur le comportement du PID. Nous avons également pu utiliser la méthode IMC tuning pour calculer les paramètres optimaux pour un PID.

Nous avons pu mettre en comparaison une simulation de notre plateforme TCLab et le fonctionnement sur la plateforme avec plusieurs scénarii sur le PID et Feedforward. Nous avons pu observer un comportement généralement similaire entre la simulation et le fonctionnement réel.

Nous avons à travers le laboratoire pu mieux comprendre la théorie vue en cours et comprendre ce qu'elle représente au sens physique.

En comparaison par rapport à l'an dernier nous avons personnellement vu une forte évolution dans notre compréhension de la matière, nous notons également une nette amélioration dans la réalisation de ce laboratoire.

VI. Références :

[Temperature Control Lab \(apmonitor.com\)](http://apmonitor.com)

Cours de Mr De Bruyne

VII. Annexes :

a. Détermination de PV0 pour MV0=60% et DV0=30%

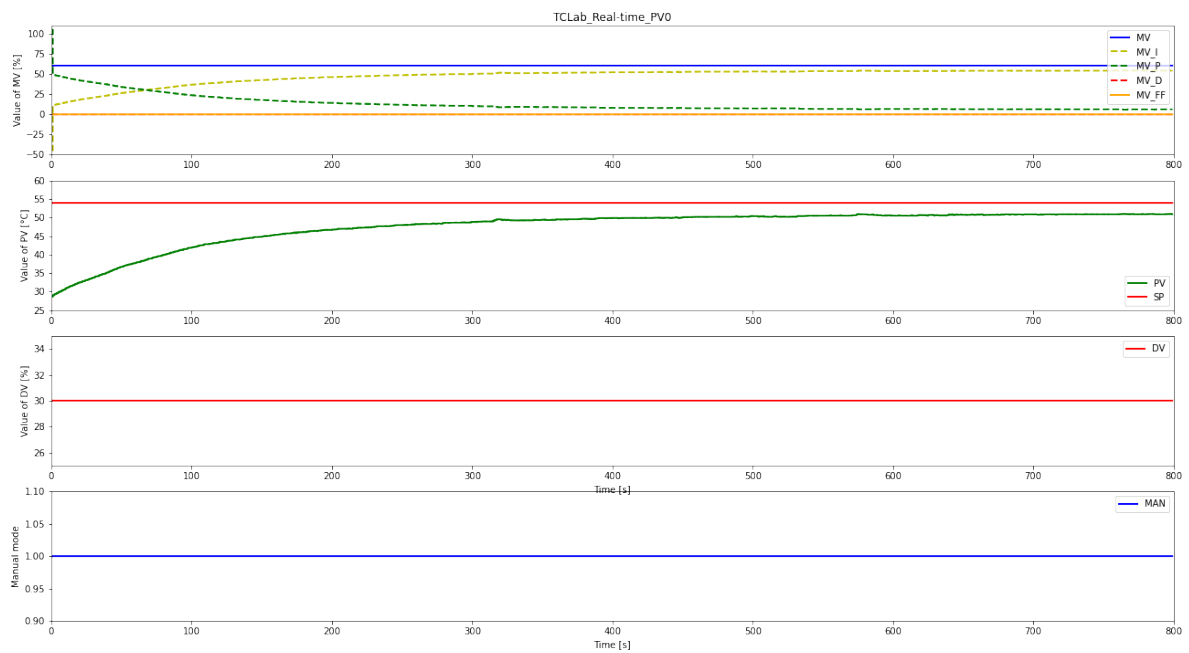


Figure 26

b. Expérimentation pour MV0=60% et DV0=30% pour une modélisation de MV0=50% et DV0=50%

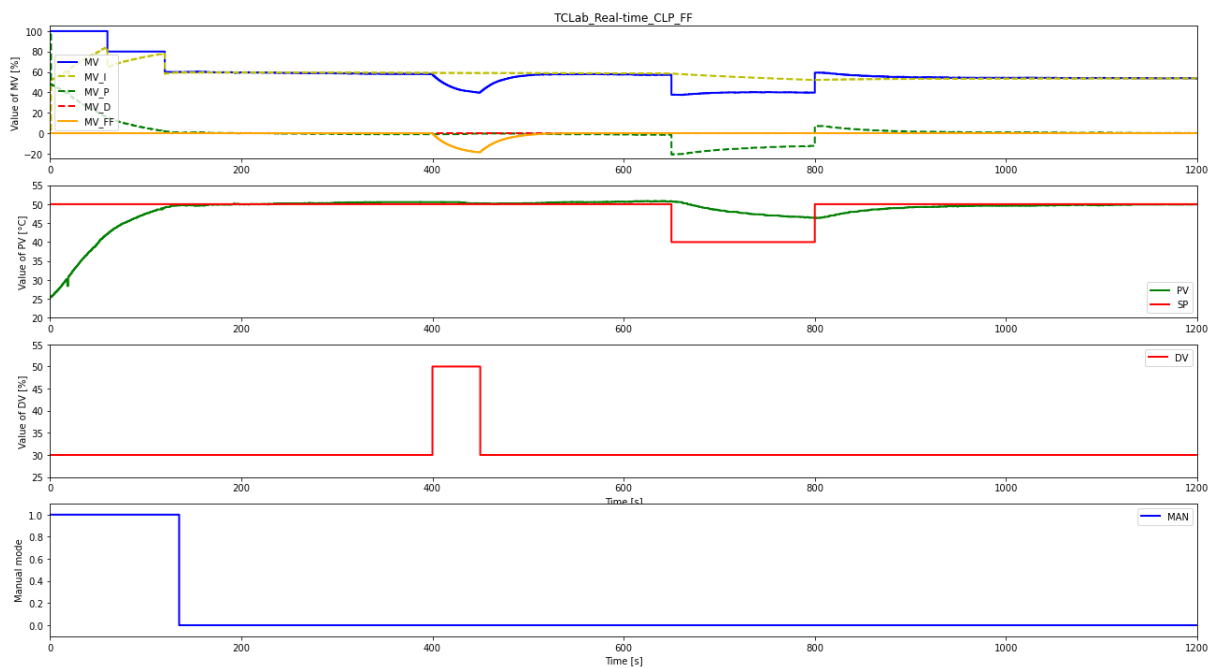


Figure 27

c. Réponse indicielle sur MV pour $MV_0=50\%$ et $DV_0=50\%$:

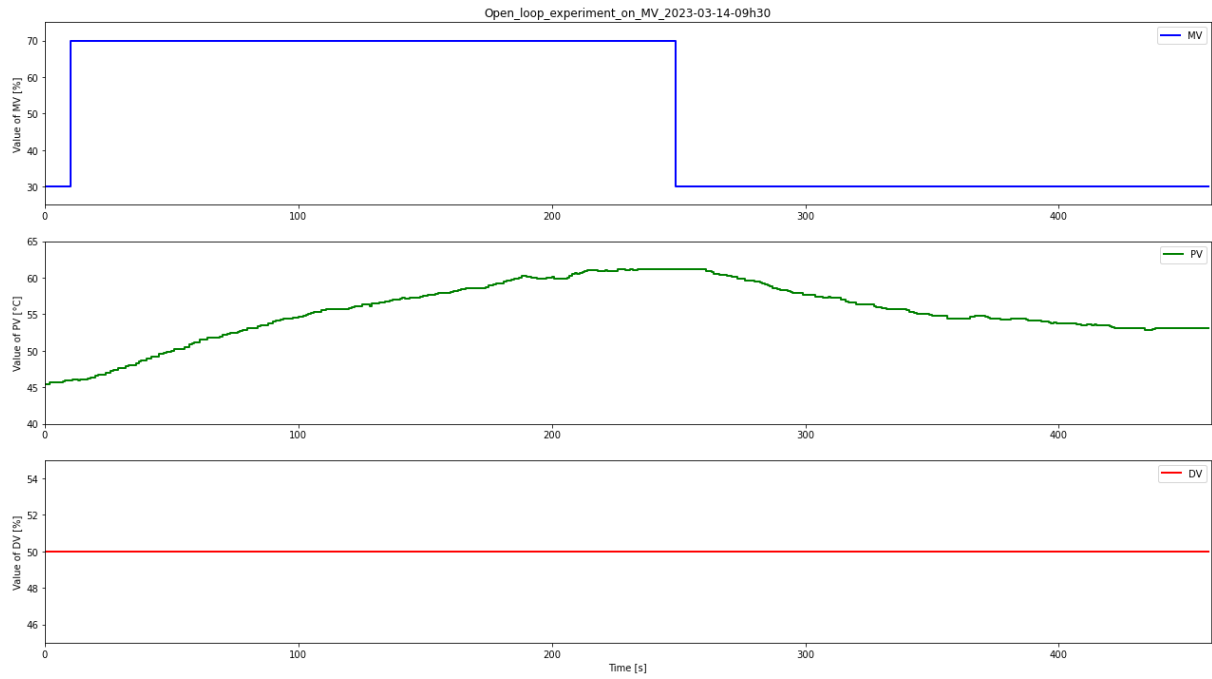


Figure 28