



*Institut National des Sciences Appliquées*  
*Département Génie Energétique et*  
*Environnement*

## **Projet de Fin d'Etudes n°19** **Année 2009-2010**

Institut National des Sciences Appliquées, INSA - Lyon

# Mesure de la température interne d'un foyer de combustion

RAPPORT FINAL

Étudiant :

**GONZALEZ, Javier**

Enseignants :

**ANDRÉ, Frédéric**

**GALIZZI, Cédric**



Centre de  
Thermique de  
Lyon

**CETHIL**



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes tuteurs de PFE, Frédéric ANDRE et Cédric GALIZZI pour m'aider dans cette expérience ainsi que pour leurs conseils et surtout pour m'avoir orienté et pour avoir toujours répondu à toutes mes questions de façon précise et détaillé.

Je voudrais remercier aussi à toute l'équipe du CETHIL qui m'a aidé dans tous ces mois et plus particulièrement à Sylvain LAMIGE, par sa gentillesse, par son aide désintéressée toujours avec un sourire, et par m'avoir intégré dans tout moment.

Ensuite je vais remercier toutes les personnes de mon pays qui ne parlent pas français.

Este proyecto es la cumbre tras muchos años de esfuerzo y dedicación en los que he contado con el apoyo de ciertas personas especiales sin las cuales no habría llegado a finalizar con éxito mis estudios. No tengo palabras para agradecer a mis padres todo su apoyo, gracias a ellos soy quien soy. Han estado a mi lado en todo momento, y sobre todo han encontrado las palabras exactas en los momentos más difíciles. Siguen siendo un ejemplo para mí y les brindo a ellos esta carrera. Quiero agradecer a mi hermano Carlos que también ha sido un ejemplo para mí por saber cómo hacerme sonreír en los momentos más tristes, por compartir tantas anécdotas y por hacerme ser competitivo. Me gustaría dedicar unas líneas especiales a mi hermano Luis con el que he compartido casi toda mi vida, él ha sido quien me ha mostrado cómo recorrer cada paso en el camino para ser ingeniero, sin él no hubiese sido posible llegar aquí. Quiero remarcar que gracias a él sé que se puede conseguir lo que queramos con esfuerzo, y quiero darle las gracias por todos sus consejos y sobre todo por su personalidad como ejemplo a seguir. Él sabe lo que significa llegar aquí.

Quiero agradecer de manera muy especial a María, por haberme apoyado siempre en todo, por haber sido un soplo de aire fresco y un punto de inflexión en mi carrera. Gracias a ella he sabido valorar las cosas en su justa medida y restar importancia a las adversidades. Me ha dado la estabilidad que necesitaba.

Tengo que agradecer a todos mis amigos su apoyo, comprensión e interés en mis estudios, de forma muy especial, y ellos saben por qué, a Dani, Jorge, Diego, Jesús y Juanjo muchos años compartiendo todo tipo de anécdotas.

Por último quiero agradecer a toda esa gente que ha compartido conmigo alegrías y penas en la universidad, gracias a los cuales tengo un buen recuerdo y sobre todo tengo que agradecerles haber compartido el peso de las adversidades. Doy las gracias a Javi por tantos y tantos años de sufrimientos compartidos y el cual me ha regalado los mejores momentos, ha sido un gran apoyo. Quiero agradecer a José todos sus consejos, su amabilidad, su humor, su saber estar y en general su personalidad, es un ejemplo a seguir y él lo sabe. Quiero dar las gracias, de forma muy especial y con mucho cariño a Sofía, una fuente de energía, un huracán que me ha llevado a terminar la carrera con la mayor de las sonrisas, le tengo que dar las gracias por un último año glorioso y por tantos buenos momentos compartidos. Para terminar quiero agradecer a dos personas que han hecho que este año Erasmus signifique tanto y con los cuales he compartido este final de carrera fuera de nuestras fronteras: Yago y Carmen. Tengo que darles las gracias por integrarme, por cuidar de mí y por su apoyo desinteresado, con ellos he compartido de manera muy intensa y con mucho humor este final de etapa.

Gracias a todos los que hayáis formado parte de mi carrera, ha sido un camino largo, pero volviendo la vista atrás me alegro de haberlo recorrido y más a vuestro lado.

## RESUME

Ce travail a pour but d'étalonner un instrument optique. Ce dispositif est un radiomètre qui va être utilisé pour mesurer la température interne d'un foyer de combustion. Il sert à caractériser la température selon les valeurs de tension qui fourni. Par conséquent le but de ce rapport est présenter les courbes de calibration du radiomètre obtenues à partir des mesures sur un corps noir et de vérifier ces résultats. Le travail réalisé sur le projet à été complété par une recherche et le choix de fournisseurs de fluxmètres thermiques et de peinture présentant une haute émissivité pour compléter les actions actuellement menées sur le même foyer de combustion.

**Mots clés** : étalonnage, radiomètre, température, vérification et recherche de fournisseurs.

## ABSTRACT

This work studies the calibration of an optical instrument. The instrument is a radiometer which is going to be used to measure the temperature on the inner wall of a combustion chamber. It is used to measure the temperature according to the voltage values recorded. Therefore the aim of this report is to design the radiometer calibration curves from measurements on a black body. The project is completed with the research and selection of flowmeters and high emissivity paint providers to help other projects on the same combustion chamber.

**Keywords**: calibration, radiometer, temperature, checking and searching providers.

## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	2
RESUME.....	4
SOMMAIRE..	5
LISTE DES TABLEAUX.....	6
TABLE DE FIGURES .....	7
1.- INTRODUCTION .....	8
2.- ÉTALONNAGE.....	9
2.1 Description du montage du radiomètre et de sa prise en main .....	9
2.2 Mise en fonctionnement.....	11
2.3 Résultats des expériences .....	13
2.3.1 « Filtres zéro ».....	13
2.3.2 Courbes de tendance .....	14
2.3.3 Formules .....	16
2.3.4 Mesures aléatoires et extrapolation .....	17
2.3.5 Intervalles .....	20
2.3.6 Erreurs de mesure estimées .....	21
2.3.7 Températures réelles et températures théoriques .....	22
3.- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	24
ANNEXES.....	25
ANNEXE A:    Graphiques avec les séries de mesures de zéros .....	26
ANNEXE B:    Graphiques avec les séries de mesures pour chaque filtre.....	28
ANNEXE C:    Graphiques avec les courbes de tendance possibles pour un filtre .....	34
ANNEXE D:    Formules des courbes de troisième ordre pour chaque filtre .....	37
ANNEXE E:    Tableaux de températures pour les mesures aléatoires. ....	39
ANNEXE F:    Erreur absolues et relatives.....	41
ANNEXE G:    Exemples des essais de mesures. ....	43
ANNEXE H:    Recherche des fournisseurs de fluxmètre .....	44
Recherche et choix de fournisseurs.....	45
ANNEXE I:    Recherche des fournisseurs de peinture. ....	49
BIBLIOGRAPHIE.....	50

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Longueur d'onde pour chaque filtre.....	10
Tableau 2. Données T-V. Jour 6. Mesures aléatoires.....	17
Tableau 3. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1085°C.....	17
Tableau 4. Températures moyennes estimées en comparaison avec la température réelle.....	18
Tableau 5. Variances pour les températures estimées selon le filtre.....	19
Tableau 6. Écarts-types pour les températures estimées selon le filtre.....	19
Tableau 7. Intervalles de températures pour les filtres un, deux et trois.....	20
Tableau 8. Intervalles de températures pour les filtres quatre, cinq et six.....	20
Tableau 9. Erreurs relatives selon le filtre.....	22
Tableau 10. Températures réelles vs températures théoriques.....	22
Tableau 11. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2_pour 1085°C.....	39
Tableau 12. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2_pour 1170°C.....	39
Tableau 13. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2_pour 1250°C.....	40
Tableau 14. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2_pour 1348°C.....	40
Tableau 15. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2_pour 1388°C.....	40
Tableau 16. Tableau des erreurs absolues selon la température réelle du dernier jour.....	41
Tableau 17. Tableau des erreurs relatives selon la température réelle du dernier jour.....	42
Tableau 18. Tableau des moyennes des erreurs relatives selon chaque filtre.....	42
Tableau 19. Tableau des exemples pour une valeur de tension aléatoire.....	43

## TABLE DE FIGURES

Figure 1 : Données T-V. Jour 1, filtre zéro.....	14
Figure 2 : Données T-V. Jour 3, filtre quatre.....	14
Figure 3 : Courbe de tendance linéaire. Jour 1, filtre un.....	15
Figure 4 : Courbe de tendance de polynôme de troisième ordre. Jour 1, filtre un.....	16
Figure 5 : Données T-V. Jour 2, filtre zéro.....	26
Figure 6 : Données T-V. Jour 3, filtre zéro.....	26
Figure 7 : Données T-V. Jour 4, filtre zéro.....	27
Figure 8 : Données T-V. Jour 5, filtre zéro.....	27
Figure 9 : Données T-V. Filtre 1 pour chaque jour.....	28
Figure 10 : Données T-V. Filtre 2 pour chaque jour.....	29
Figure 11 : Données T-V. Filtre 3 pour chaque jour.....	30
Figure 12 : Données T-V. Filtre 4 pour chaque jour.....	31
Figure 13 : Données T-V. Filtre 5 pour chaque jour.....	32
Figure 14 : Données T-V. Filtre 6 pour chaque jour.....	33
Figure 15 : Courbe de tendance linéaire. Formule et $R^2$ .....	34
Figure 16 : Courbe de tendance polynôme d'ordre deux. Formule et $R^2$ .....	34
Figure 17 : Courbe de tendance polynôme d'ordre trois. Formule et $R^2$ .....	35
Figure 18 : Courbe de tendance exponentielle. Formule et $R^2$ .....	35
Figure 19 : Courbe de tendance potentielle. Formule et $R^2$ .....	36
Figure 20 : Courbe de tendance logarithmique. Formule et $R^2$ .....	36



# 1.- INTRODUCTION

Le but de ce projet est centré sur l'étalonnage d'un radiomètre mais, pour commencer, je me suis informé sur différentes méthodes de mesure de la température et du flux dans une chambre de combustion afin d'avoir une idée générale sur les problématiques liées à mon projet. Les méthodes étudiées ont été les suivantes :

- Thermocouples
- Fluxmètre
- Caméra Infrarouge
- Radiomètre

Mon projet va être défini en deux parties principales:

- 1.- Étalonnage du radiomètre : obtenir des courbes de réponse du radiomètre pour différentes températures de la surface d'un corps noir.
- 2.- Vérifier l'efficacité de cet étalonnage et donner des exemples pour expliquer comment mesurer la température de la chambre de combustion à partir des courbes obtenues pour un corps noir dans la première partie.

Dans ce rapport la méthode pour la calibration a été expliquée de la façon la plus claire et synthétique possible. Des détails sont proposés dans les annexes sur lesquelles on peut voir tous les graphiques étudiés pour faire l'étalonnage. Finalement deux annexes où est expliquée la recherche des fournisseurs de fluxmètres et aussi de peinture à haute émissivité pour compléter ma formation comme ingénieur dans le Centre de Thermique de Lyon.

## 2.- ÉTALONNAGE

### 2.1 Description du montage du radiomètre et de sa prise en main

Afin de vérifier le réglage de notre montage du radiomètre, nous allons réaliser des expériences sur un corps noir.

Un radiomètre est un instrument qui permet de mesurer l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique, dans différents domaines de longueurs d'onde, tels que l'ultraviolet, le visible ou l'infrarouge.

Les radiomètres sont notamment utilisés en météorologie, embarqués sur des satellites tels que Météosat ou SPOT. Ils effectuent des mesures sur des canaux bien déterminés de longueurs d'onde, ce qui leur permet de mesurer avec précision le contenu en vapeur d'eau et en eau liquide de l'atmosphère. Dans notre cas, nous voulons l'utiliser pour mesurer la température de la paroi d'un foyer de combustion. Nous devons alors étalonner l'instrument pour atteindre notre but.

Nous allons suivre le principe qui dit que les corps émettent un rayonnement thermique qui diffère d'une substance à l'autre. On peut cependant évaluer le maximum d'énergie calorifique pouvant être rayonné par la matière à chaque température et longueur d'onde. L'émetteur idéal qui rayonnerait cette énergie est appelé corps noir et sert d'étalon de rayonnement.

Un corps noir définit l'état d'équilibre thermodynamique parfait entre le rayonnement et la matière dans une cavité rayonnante isotherme à la température thermodynamique  $T$ . Par définition, le corps noir absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit. On peut alors évaluer l'énergie émise par les autres corps relativement à celle qu'émettrait le corps noir dans les mêmes conditions, à l'aide de coefficients appelés émissivités.

Nous avons utilisé un corps noir et nous lui avons imposé une température de consigne qui n'est pas égale à la température réelle. Les équivalences ont été obtenues par calibration déjà effectuée dans une étude préliminaire.

Le porte-filtres est équipé de 6 filtres qui sont centrés sur les longueurs d'onde suivantes :

Filtre	1	2	3	4	5	6
Longueur d'onde centrale(nm)	2850	2725	4250	2100	2470	4530

**Tableau 1. Longueur d'onde pour chaque filtre**

Ces chiffres ont déjà été étudiés en prenant en compte les points suivants: la longueur d'onde des filtres doit se situer dans des régions spectrales précises de l'infrarouge où l'un des constituants majoritaires des résidus de combustion émet du rayonnement thermique et que le taux de transmission des filtres doit être le plus élevé possible dans ces régions afin de perdre le moins d'information possible provenant de la source d'émission.

Dans un premier temps, il faut aligner le radiomètre avec les filtres et le corps noir qui a une ouverture au travers de laquelle le rayonnement est émis. Nous avons centré le bloc radiomètre - porte-filtres et le corps noir en les fixant à deux plaques pour commencer à étalonner le radiomètre. Ce réglage est obligatoire car nous devons nous assurer que la lumière entrant dans notre système optique provient du corps noir à une température fixée et non de ses frontières (équivalentes à un milieu gris). Par conséquent, à la fin de l'étalonnage, nous pourrons utiliser le radiomètre pour estimer précisément la température d'une paroi.

## 2.2 Mise en fonctionnement

En exploitant les résultats d'autres études qui ont utilisé le corps noir, nous savons qu'il faut imposer un débit d'eau permettant le refroidissement externe du corps noir. Ce débit d'eau doit être compris entre 3,0 et 4,5 litres à la minute. Il faut bien vérifier que la valeur ne soit pas inférieure à 3 litres par minute sinon le refroidissement ne serait pas suffisant.

On met l'alimentation en mode chauffe et nous réglons la consigne à la température voulue. Nous commençons par la température la plus haute. Nous devons laisser que la température augmente de façon constante. Ensuite nous faisons les mesures pour cette température et après nous descendons pour toutes les autres températures, c'est pour cela que nous commençons par la plus haute parce qu'il sera plus facile pour le système de descendre par intervalles.

Ensuite on met en marche le radiomètre et l'ordinateur avec lequel nous allons recevoir toutes les données avec un logiciel spécifique (labview) pour prendre des mesures du radiomètre. Notre objectif est de calibrer le radiomètre et d'obtenir des courbes température-tension. Nous allons recevoir beaucoup de données de tension mais ce que nous connaissons de manière précise, c'est la température que nous avons fixée et le filtre que nous avons choisi à chaque fois. Donc nous pourrions considérer la température (en °C) en fonction de la tension (en mV) pour chaque filtre choisi.

Une fois atteinte la première température nous avons commencé à faire des mesures sans filtre. Ce que nous avons fait est de mettre une pièce de carton entre le corps noir et le porte-filtres et une deuxième mesure entre le porte-filtres et le radiomètre pour nous assurer que le rayonnement extérieur est négligeable. Ensuite nous avons fait deux mesures pour chaque filtre. Après le sixième filtre nous avons réalisé deux dernières mesures avec le morceau de carton pour le « filtre zéro ». Nous avons fait les mêmes opérations pour chaque température : 1429°C, 1326°C, 1223°C, 1119°C et 1014°C.

Quand les expériences sont terminées il faut mettre l'alimentation en mode réglage et abaisser la température de consigne à 100 °C.

Nous avons suivi pas à pas ces opérations pendant 5 jours afin d'avoir suffisamment de données pour l'obtention des courbes tension-température.

Le dernier jour nous avons effectué des mesures pour quelques températures aléatoires afin de vérifier que nos courbes sont correctes et constater s'il est possible d'extrapoler les résultats et confirmer le bon fonctionnement du radiomètre. Ces températures étaient: 1388°C, 1348°C, 1250°C, 1170°C et 1085°C (toutes dans l'intervalle de température des autres jours). Dans ce cas nous avons commencé avec 1250°C et nous avons pris les autres aléatoirement dans cet ordre : 1250°C, 1170°C, 1348°C, 1085°C et 1388°C, parce que nous savons que le corps noir est un cas idéal, alors nous voulons savoir avec précision et utiliser le radiomètre pour d'autres expériences réelles avec des objets comme la veine qui contient un milieu réactif et dont le rayonnement varie avec le temps. Nous avons réalisé les mesures en suivant la même méthode que les campagnes de mesures précédentes.

Pour finir nous avons compilé toutes les données avec un programme qui interprète les données du logiciel, comme par exemple : 01ab cdef donne une valeur de tension en volts de :  $+c,def * 10^{-ab}$  V algébriquement, c'est-à-dire :

Donnée : 0104 2234 → est transformé en →  $2,234 * 10^{-04}$  Volts selon le programme.

Une fois que nous avons compilé et adapté à Excel toutes les valeurs de tension, nous les avons analysées en traçant des graphiques.

## 2.3 Résultats des expériences

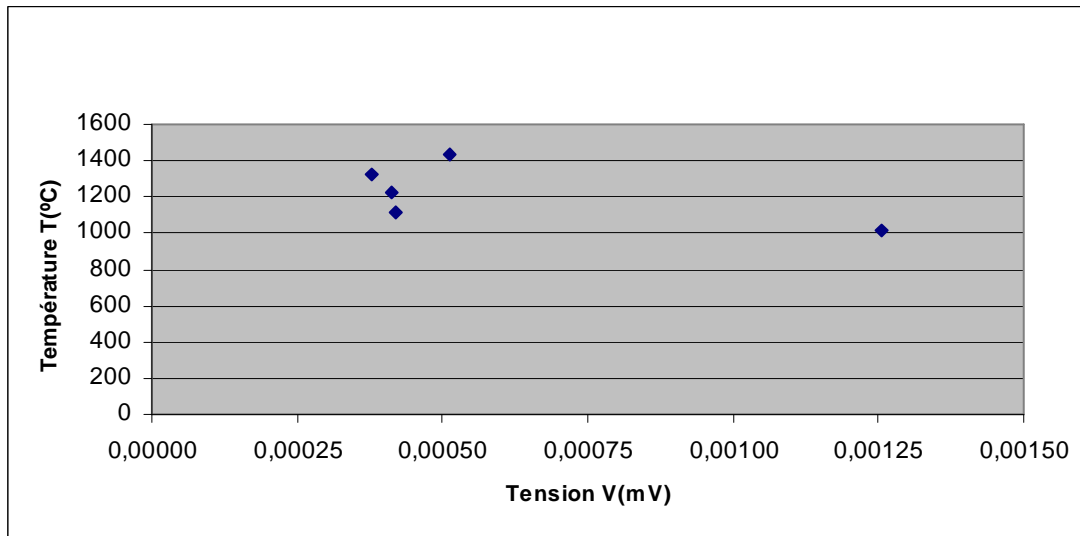
L'objectif de cette calibration est d'utiliser le radiomètre pour mesurer la température d'un objet. La réponse du radiomètre est une valeur de tension. C'est pour cela que nous devons pouvoir transformer les chiffres obtenus pour ensuite estimer la température à partir des nos courbes tension-température.

Dans un premier temps nous avons traité les données et tracé des graphiques  $T(V)$  pour chaque jour et chaque filtre. De cette façon nous pouvons estimer une température inconnue à partir des chiffres en mV du radiomètre.

### 2.3.1 « Filtres zéro »

Au début nous avons constaté que les valeurs pour le filtre sans rayonnement (« filtre zéro ») sont négligeables. C'est nécessaire de le savoir pour vérifier que toutes les autres données ne sont pas influencées par le rayonnement extérieur mais par le corps noir uniquement. Dans le cas contraire il serait impossible de pouvoir étalonner le radiomètre. On peut voir que les résultats pour le filtre zéro sont de l'ordre du  $\mu V$  tandis que toutes les autres sont de l'ordre du mV, donc trois ordres de grandeur supérieurs. La première conclusion est que le rayonnement extérieur n'affecte pas les mesures.

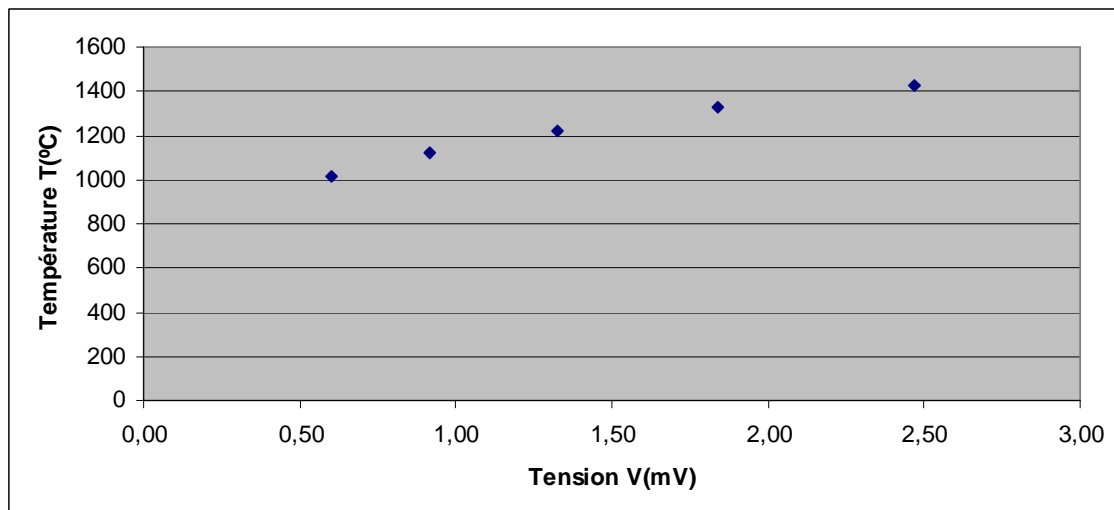
On peut voir ici un graphique qui représente une série de mesures pour le « filtre zéro ». Comme on pouvait s'y attendre aucune dépendance n'est observée. En plus, la température du corps noir est invariable. Toutes les autres figures sont proposées en annexe A.



**Figure 1 : Données T-V. Jour 1, filtre zéro.**

### 2.3.2 Courbes de tendance

Ensuite nous avons tracé les graphiques pour chaque jour et chaque filtre. Nous présentons ici un graphique significatif pour illustrer la tendance des données. Toutes les autres sont en annexe B.



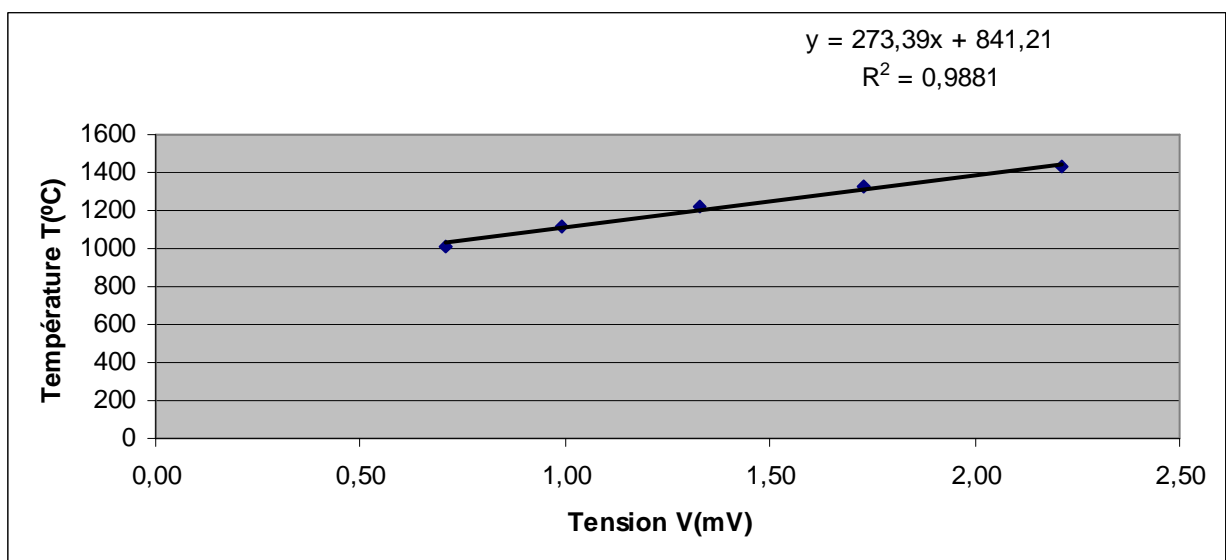
**Figure 2 : Données T-V. Jour 3, filtre quatre.**

Cette tendance est très importante puisque nous devons trouver des courbes dont la formule nous permettrait de déterminer les valeurs de températures à partir des tensions.

Dans un second temps, nous avons dû trouver les courbes de tendance  $T(V)$  pour les données. L'explication pour le choix du type de courbe est le suivant : nous avons essayé six types de courbes avec deux filtres : linéaire, polynôme d'ordre deux, polynôme d'ordre trois, exponentiel, potentiel et logarithmique. Pour connaître la courbe la plus précise il existe une méthode. Nous pouvons calculer le coefficient de détermination,  $R^2$ .

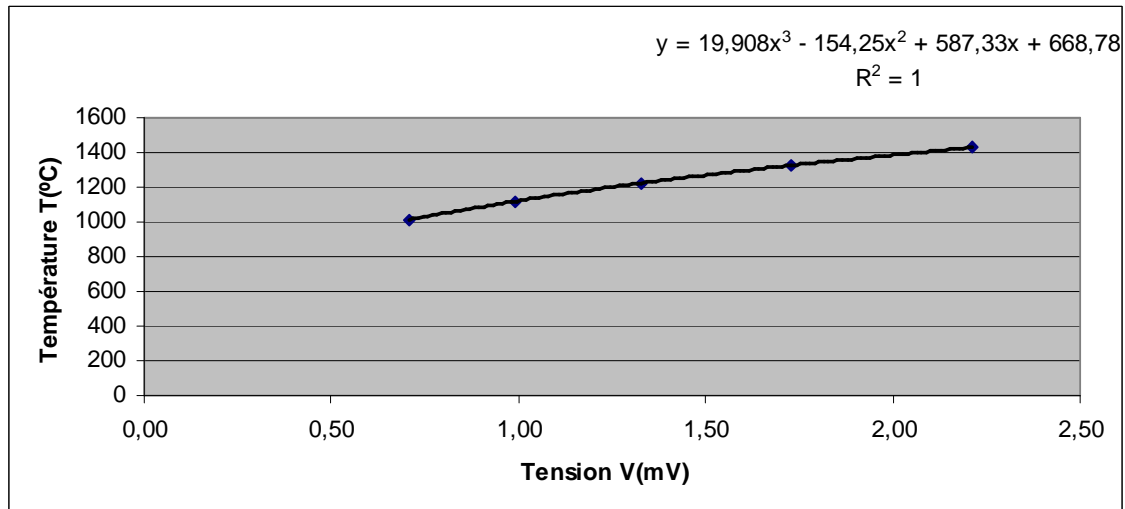
La statistique  $R^2$ , dont la valeur se situe entre 0 et 1, indique la force de la relation entre deux variables. C'est interprété comme le pourcentage de variation de la variable dépendante expliquée par le modèle. Un R-carré proche de 1 signifie que la courbe de tendance décrit précisément la relation entre la variable dépendante et l'autre.

Les courbes de tendance, présentées sur les figures 3 et 4, que nous avons obtenues pour le filtre 1 pour pouvoir vérifier que notre choix est le plus cohérent. Toutes les autres courbes sont en annexe C.



**Figure 3 : Courbe de tendance linéaire. Jour 1, filtre 1.**





**Figure 4 : Courbe de tendance du polynôme de troisième ordre. Jour 1, filtre 1.**

On peut constater que la courbe de tendance utilisant un polynôme de troisième ordre est celle qui s'adapte la mieux à nos données. Son R-Carré vaut 1, toutes les autres sont proches de 1, mais pas aussi précises. Tous les points sont plus adaptés à la ligne comme on peut le voir. Donc nous prendrons les courbes de tendance de polynôme de troisième ordre dont les formules nous serviront pour extrapoler les résultats.

### 2.3.3 Formules

Nous avons maintenant obtenu 5 courbes T-V (de chaque jour) pour chaque filtre et chaque jour, et nous devons encore les synthétiser. Ici sont présentées les formules pour le premier, toutes les autres formules des différents filtres sont en annexe D.

Filtre 1:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 19,908[\text{V}(\text{mV})]^3 - 154,25[\text{V}(\text{mV})]^2 + 587,33[\text{V}(\text{mV})] + 668,78$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 15,579[\text{V}(\text{mV})]^3 - 133,35[\text{V}(\text{mV})]^2 + 552,59[\text{V}(\text{mV})] + 686,72$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 31,769[\text{V}(\text{mV})]^3 - 201,22[\text{V}(\text{mV})]^2 + 638,43[\text{V}(\text{mV})] + 661,62$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 29,866[\text{V}(\text{mV})]^3 - 199,65[\text{V}(\text{mV})]^2 + 660,19[\text{V}(\text{mV})] + 664,81$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 36,098[\text{V}(\text{mV})]^3 - 221,8[\text{V}(\text{mV})]^2 + 683,13[\text{V}(\text{mV})] + 658,76$$

### 2.3.4 Mesures aléatoires et extrapolation

Maintenant nous avons toutes les formules, alors ce que nous faisons est, avec les données prises lors du dernier jour, mettre les valeurs de tension dans toutes les formules et comparer les résultats avec la température que nous avons choisi aléatoirement pour cible.

Température (°C)	1085	1170	1250	1348	1388
Filtre	Tension (mV)				
1	0,827406	1,113458	1,404292	1,686175	1,787033
2	1,659367	2,260992	2,858692	3,467517	3,691367
3	0,234168	0,308393	0,375094	0,410640	0,424757
4	0,773382	1,104892	1,452525	1,836675	1,985150
5	0,366423	0,495247	0,624809	0,791495	0,833199
6	0,098403	0,127270	0,152018	0,167088	0,171745

**Tableau 2. Données T-V. Jour 6. Mesures aléatoires.**

Ensuite on montre l'extrapolation pour la température 1085°C. La méthode consiste à prendre la valeur de tension correspondante à chaque filtre, soit la première colonne du tableau 1 dans ce cas et la mettre dans les formules pour chaque jour (cinq par filtre). Nous obtiendrons un tableau des températures autour de 1085°C plus ou moins proche selon le filtre. L'objectif sera par conséquent d'avoir des intervalles où on peut trouver notre température estimée.

Température (°C)		1085					
Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Jour	J1	1060,42	1052,32	1033,50	1066,51	1071,59	1022,75
	J2	1061,47	1055,85	1039,96	1066,92	1069,48	1018,90
	J3	1070,10	1066,52	1067,05	1073,22	1080,34	1038,50
	J4	1091,29	1086,79	1122,34	1089,77	1101,92	1091,14
	J5	1092,59	1088,19	1111,49	1091,04	1104,13	1101,58
Moyenne		1075,17	1069,94	1074,87	1077,49	1085,49	1054,58

**Tableau 3. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1085°C**

Nous avons répété cette méthode pour les cinq températures aléatoires : 1085°C, 1170°C, 1250°C, 1348°C et 1388°C, c'est pour cela qu'on a maintenant cinq tableaux comme le Tableau 2. Ils sont présentés en annexe E. On peut constater que les moyennes ne correspondent pas exactement à la valeur de température réelle, soit notre valeur est autour de la moyenne pour chaque filtre. Ensuite nous devons calculer la variance et la déviation typique pour estimer les intervalles où nous pouvons trouver la température avec une marge de confiance et ainsi vérifier que les résultats ne sont pas éloignés de la réalité.

Les formules utilisées pour calculer la moyenne, la variance et la déviation typique sont les suivantes

Moyenne : 
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^5 x_i}{n}$$

Variance : 
$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - \bar{X})^2}{n}$$

Écart-type : 
$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Moyennes :

Filtre	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1085	1075,17	1069,94	1074,87	1077,49	1085,49	1054,58
1170	1174,38	1169,12	1188,14	1176,68	1179,82	1165,39
1250	1259,65	1251,98	1276,70	1260,04	1258,45	1253,78
1348	1330,99	1324,49	1319,29	1335,16	1343,55	1303,98
1388	1354,51	1348,97	1335,38	1361,19	1363,13	1318,87

**Tableau 4. Températures moyennes estimées en comparaison avec la température réelle.**

Variations :

Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Température (°C)	1085	198,88	227,56	1316,99	117,05	218,69	1217,95
	1170	263,94	297,03	1454,24	152,60	277,70	2144,67
	1250	301,81	336,92	1436,29	178,74	285,03	2796,42
	1348	623,00	924,80	2188,19	375,14	290,65	4940,83
	1388	349,03	389,21	1322,83	227,94	271,28	3022,84

**Tableau 5. Variations pour les températures estimées selon le filtre.**

Écarts-types :

Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Température (°C)	1085	14,10	15,09	36,29	10,82	14,79	34,90
	1170	16,25	17,23	38,13	12,35	16,66	46,31
	1250	17,37	18,36	37,90	13,37	16,88	52,88
	1348	24,96	30,41	46,78	19,37	17,05	70,29
	1388	18,68	19,73	36,37	15,10	16,47	54,98

**Tableau 6. Écarts-types pour les températures estimées selon le filtre.**

De cette façon nous pouvons connaître la précision de nos mesures. On peut observer dans un premier temps que pour les filtres trois et six la déviation est notablement plus grande, c'est-à-dire que les points de mesure sont plus éloignés de la courbe choisie pour définir la tendance et par conséquent les formules sont moins précises.

Par ailleurs on peut constater dans le tableau 4 qu'aucune moyenne pour la valeur autour de 1388°C arrive à ce chiffre, ce qui veut dire que nous avons commis des erreurs de mesure. Donc pour finir avec notre étalonnage nous vérifions que les valeurs choisies sont dedans les intervalles proposés pour chaque mesure aléatoire.

### 2.3.5 Intervalles

La méthode pour obtenir les intervalles consiste à définir la borne inférieure comme  $\bar{X} - \sigma$  et la borne supérieure comme  $\bar{X} + \sigma$  et constater que nos valeurs appartiennent aux intervalles.

Température (°C)	Filtre					
	F1	F1	F2	F2	F3	F3
1085	1061,07	1089,28	1054,85	1085,02	1038,58	1111,16
1170	1158,13	1190,63	1151,89	1186,36	1150,01	1226,27
1250	1242,28	1277,03	1233,62	1270,33	1238,79	1314,59
1348	1306,03	1355,96	1294,08	1354,89	1272,51	1366,07
1388*	1335,83	1373,19	1329,24	1368,69	1299,08	1371,75

\*Valeur non comprise dans les intervalles

**Tableau 7. Intervalles de températures pour les filtres un, deux et trois.**

Température (°C)	Filtre					
	F4	F4	F5	F5	F6	F6
1085	1066,67	1088,31	1070,71	1100,28	1019,68	1089,48
1170	1164,33	1189,03	1163,16	1196,49	1119,08	1211,69
1250	1246,67	1273,41	1241,56	1275,33	1200,89	1306,66
1348	1315,79	1354,53	1326,50	1360,59	1233,69	1374,27
1388*	1346,09	1376,29	1346,66	1379,59	1263,89	1373,85

\*Valeur non comprise dans les intervalles

**Tableau 8. Intervalles de températures pour les filtres quatre, cinq et six.**

La valeur 1388°C n'est pas comprise dans ces intervalles, mais aucune explication n'a été trouvée pour ce problème. Toutes les autres données sont comprises dans les intervalles correspondants. Par conséquent on peut conclure que l'étalonnage du radiomètre est précis pour les courbes étudiées.

### 2.3.6 Erreurs de mesure estimées

Le but de cet étalonnage est d'estimer la température interne d'un foyer de combustion. Quand les mesures seront faites, une température sera calculée et pour obtenir une bonne précision il est nécessaire d'estimer une erreur de mesure autour de la température obtenue.

Pour ce faire nous avons calculé les erreurs pour chaque filtre. Nous avons calculé les erreurs absolues, après les erreurs relatives et à la fin nous avons obtenu la moyenne de ces erreurs pour chaque filtre. Les formules pour déterminer les erreurs absolues et les erreurs relatives sont les suivantes :

Erreur absolue :

$$\varepsilon_a = |T_{\text{exp}} - T_{\text{th}}|$$

Erreur relative :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{T_{\text{th}}} = \frac{|T_{\text{exp}} - T_{\text{th}}|}{T_{\text{th}}} = \frac{|valeur_{\text{approchée}} - valeur_{\text{réelle}}|}{valeur_{\text{réelle}}}$$

Nous avons omis la valeur 1388°C parce que c'est une valeur pour laquelle la dispersion est très haute. Ensuite nous avons calculé l'erreur absolue pour chaque filtre comme la différence entre la température théorique ( $T_{\text{th}}$ ), celle que nous avons prise le jour des mesures aléatoires (1085°C, 1170°C, 1250°C et 1348°C), et les cinq mesures pour chaque jour et chaque filtre. Par conséquent nous avons obtenu vingt erreurs absolues pour chaque filtre. Avec cette erreur nous avons obtenu l'erreur relative pour le même numéro de données. Pour synthétiser tous ces chiffres nous avons calculé la moyenne des erreurs relatives pour chaque filtre de façon à ce qu'il en y ait une pour chacun, que nous utiliserons (en pourcentage) pour estimer la température interne. Les tableaux avec toutes les erreurs absolues et relatives sont en annexe F.

On peut voir dans le tableau 9 les erreurs relatives estimées par filtre.

Filtre	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Pourcentage (%)	1,09	1,22	2,36	0,84	1,02	3,14

**Tableau 9. Erreurs relatives selon le filtre.**

### 2.3.7 Températures réelles et températures théoriques

On peut voir que les erreurs ne sont pas très significatives, mais on doit comparer les températures théoriques et celles réelles pour assurer que la calibration est correcte. Idéalement il aurait fallu faire une seconde journée de test avec des températures aléatoires pour clairement valider la technique. Cette journée de test n'ayant pu être faite nous avons décidé de tester la méthode comme si la journée supplémentaire avait donné le même résultat que le jour précédent. Afin de vérifier la calibration on va prendre les valeurs de tension reçues par le radiomètre et on va les calculer avec nos formules, ensuite avec les erreurs correspondantes à chaque filtre on va vérifier que nos mesures réelles ( $T_{réelles}$ ) sont comprises dedans les intervalles théoriques ( $T \pm \Delta T$ )<sub>calculés</sub>.

Dans le tableau 10, on peut voir la comparaison entre les deux températures, réelle et théorique.

Tréelle (°C)	1085	1170	1250	1348
Tension (mV)	0,77	2,26	1,40	0,41
Filtre	4	2	1	3
Tcalculée(°C)	1076,36	1168,97	1259,57	1318,54
$\Delta T$ (°C)	8,93	14,26	13,73	31,11

**Tableau 10. Températures réelles vs températures théoriques.**

Les écarts observés avec le tableau précédant viennent de la troncature des valeurs de tension à deux chiffres significatifs.

Toutes les  $T_{\text{Réelles}}$  sont dans les intervalles  $(T \pm \Delta T)$  calculés, c'est-à-dire :

$$1085 \in [1067,43 ; 1085,29]$$

$$1170 \in [1154,71 ; 1183,23]$$

$$1250 \in [1236,27 ; 1273,30]$$

$$1348 \in [1287,43 ; 1349,65]$$

Les mesures avec le radiomètre sont complètement caractérisées maintenant. Par conséquent nous sommes prêts pour utiliser le radiomètre avec toutes ces informations dans le but de mesurer la température et obtenir une valeur avec son erreur et ainsi caractériser le foyer.

Quand le radiomètre sera utilisé pour faire des mesures de température on obtiendra des valeurs de tension en mV et on utilisera les formules des courbes de tendance (selon le filtre) pour faire l'extrapolation des résultats. Nous aurons alors cinq températures, ce que nous proposons est de calculer la moyenne et de regarder le tableau 8 pour déterminer l'erreur. Nous avons réalisé quelques exemples en déterminant la température de mesures aléatoires pour clarifier l'explication. Ils sont tous en annexe G.



### 3.- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le travail présenté dans ce mémoire aborde l'étalonnage d'un radiomètre et son utilisation dans un futur proche. Après l'étude statistique on peut dire que les résultats sont fiables puisqu'il n'y a pas d'erreur de mesure significative. Par conséquent on peut conclure que l'étalonnage du radiomètre est précis pour les courbes étudiées.

Ensuite, il est nécessaire de bien comprendre chaque étape du processus d'étalonnage pour les futures calibrations.

Par ailleurs le but de cet étalonnage est de mesurer la température interne d'un foyer de combustion, donc ce travail est aussi la référence pour cela. On obtiendra des valeurs de tension en mV et on utilisera les formules des courbes de tendance pour faire l'extrapolation des résultats sans oublier que pour préciser les résultats il faut donner la mesure avec son erreur correspondante.

Nous espérons que la rédaction est assez claire pour la personne amenée à faire ces mesures. Nous avons essayé de prendre en compte cela tout le temps en rédigeant en ce but.

Enfin, ce Projet de Fin d'Etude fut une expérience à la fois nouvelle et enrichissante. L'étalonnage a été complété par une recherche de fournisseurs de fluxmètres et aussi des fournisseurs de peinture pour un autre projet sur le même foyer de combustion pour lequel il était nécessaire de peindre la paroi pour utiliser une caméra infrarouge. Par conséquent, à la fin, j'ai pu découvrir plusieurs manières de mesurer la température d'un foyer de combustion. Toutes les références à la recherche des fournisseurs de fluxmètres se trouvent en annexe H et pour les fournisseurs de peinture en annexe I.

# ANNEXES

## ANNEXE A: Graphiques avec les séries de mesures de zéros

On peut voir ici les graphiques qui représentent les séries de mesures des différents zéros.

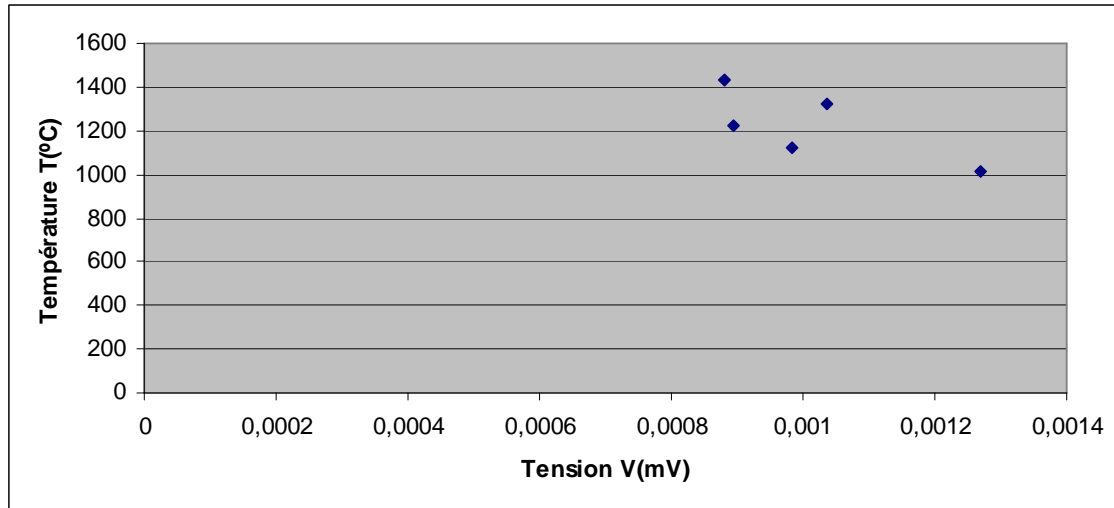


Figure 5: Données T-V. Jour 2, filtre zéro.

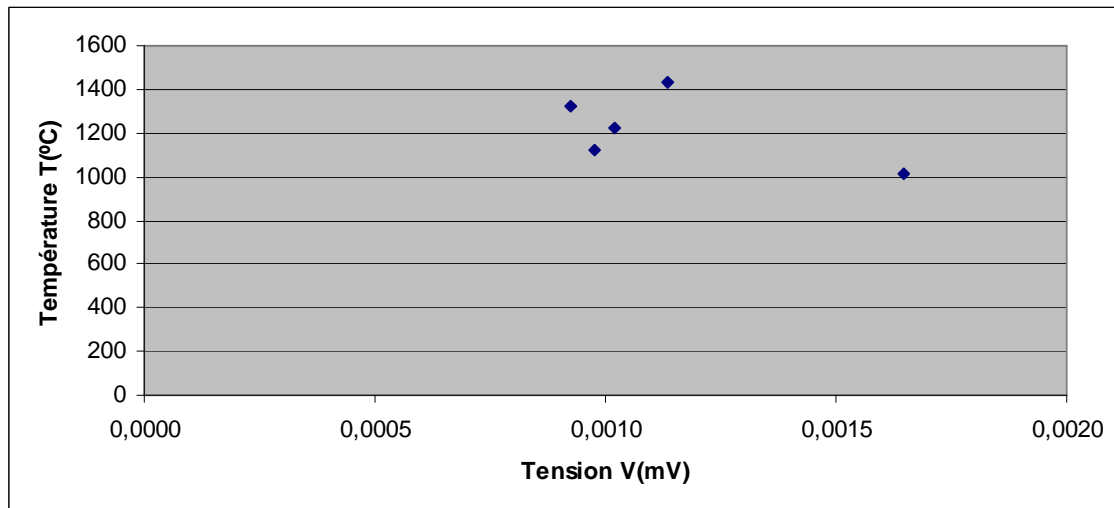
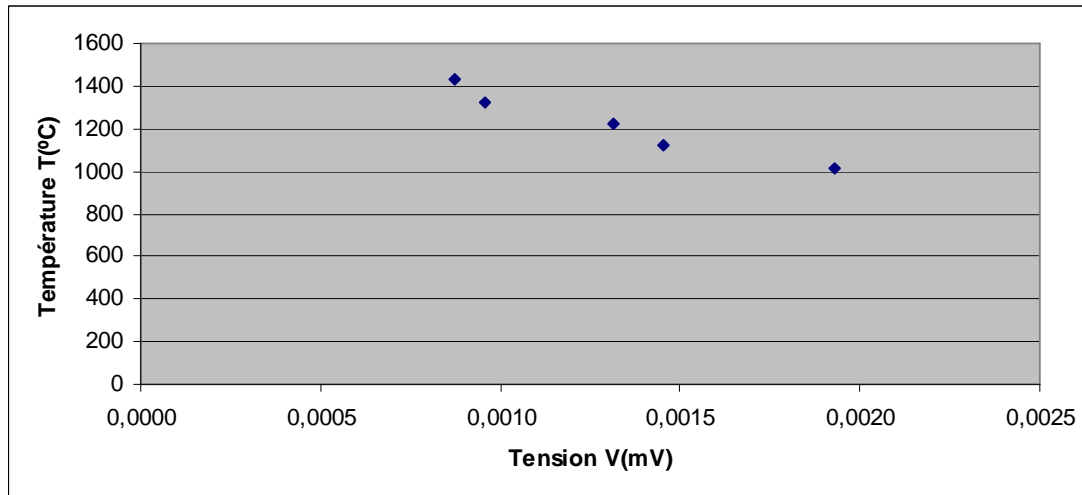
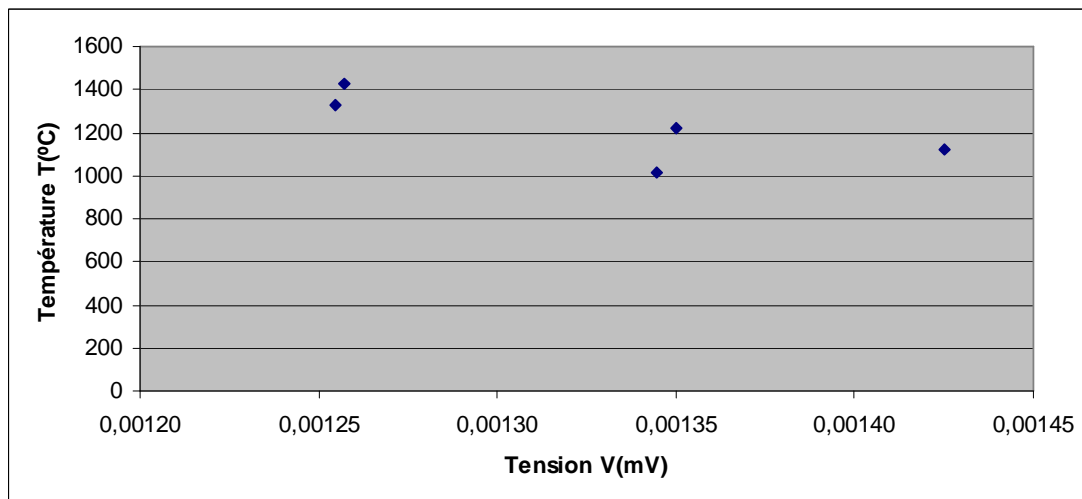


Figure 6: Données T-V. Jour 3, filtre zéro.



**Figure 7: Données T-V. Jour 4, filtre zéro.**



**Figure 8: Données T-V. Jour 5, filtre zéro.**

On peut constater que toutes les valeurs sont négligeables. L'ordre de grandeur est en microvolts en comparaison avec les données obtenues pour chaque filtre en millivolts.

## ANNEXE B: Graphiques avec les séries de mesures pour chaque filtre

Présentation des données T-V pour chaque journée de mesure.

### Filtre 1 :

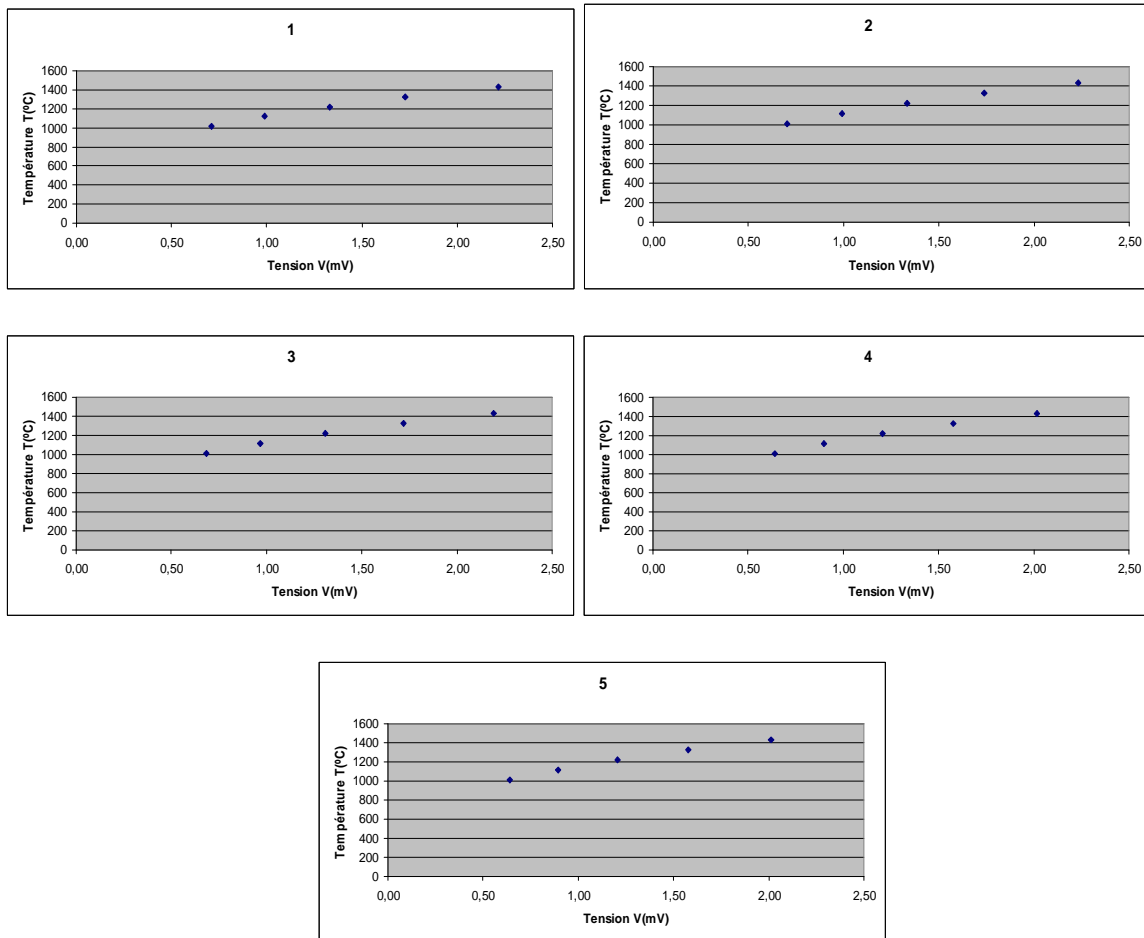


Figure 9 : Données T-V. Filtre 1 pour chaque jour.

Filtre 2 :

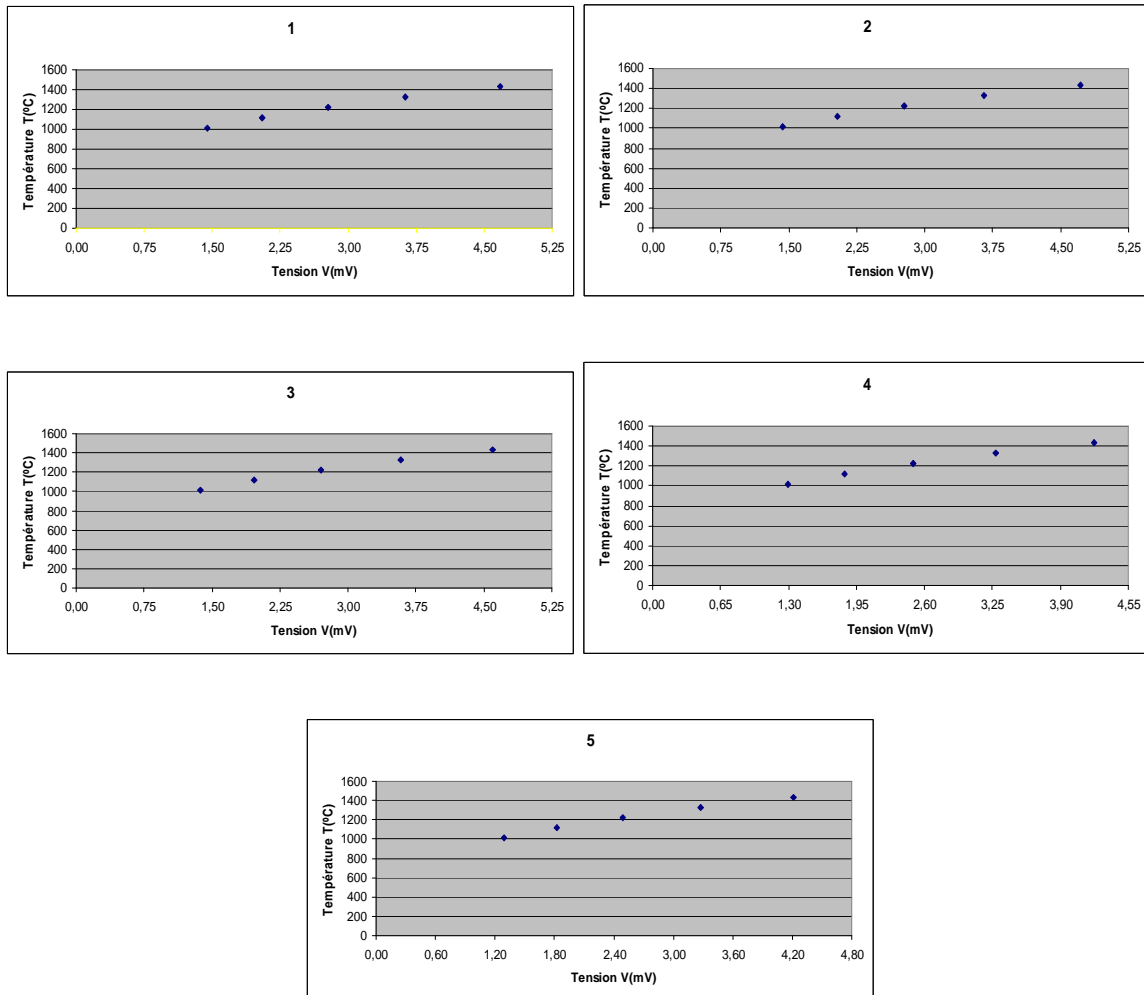


Figure 10 : Données T-V. Filtre 2 pour chaque jour.

Filtre 3 :

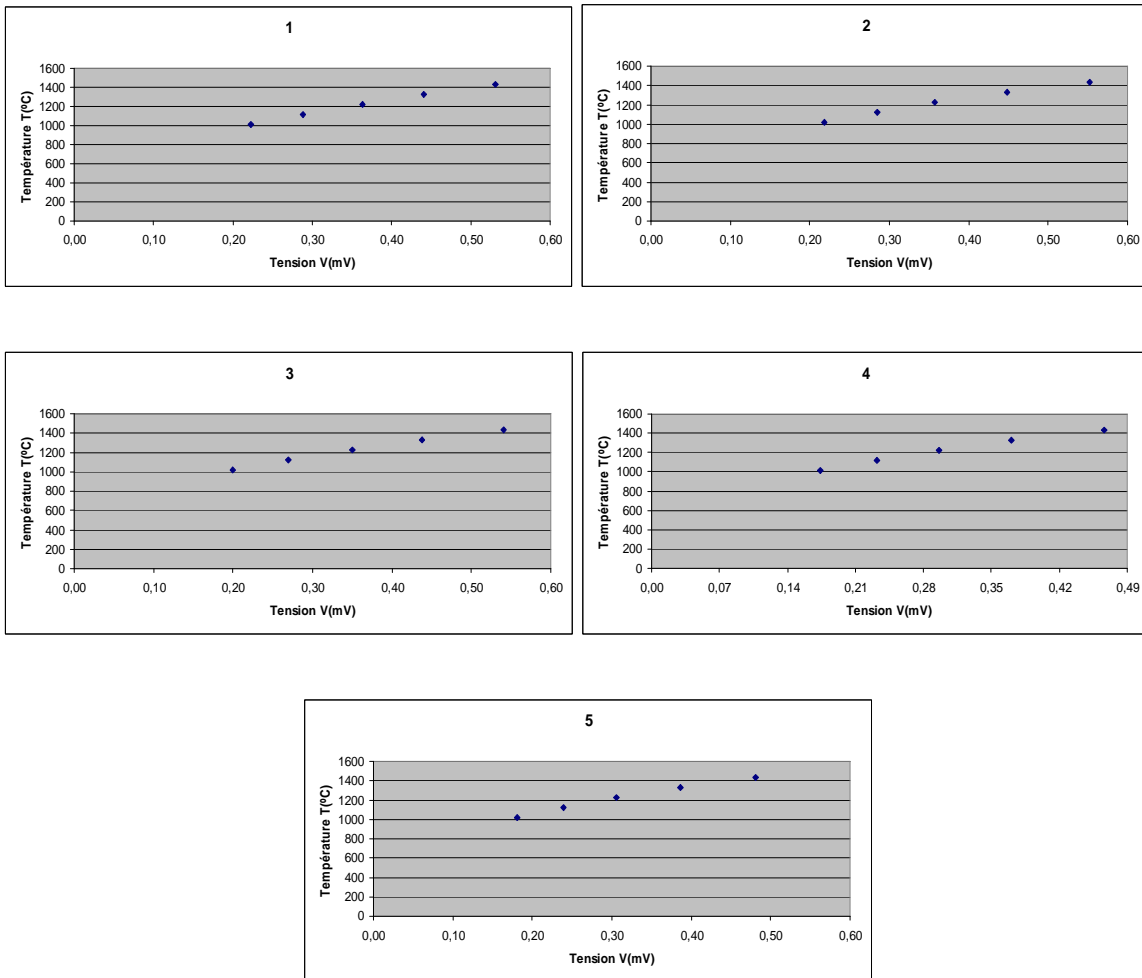


Figure 11 : Données T-V. Filtre 3 pour chaque jour.

Filtre 4 :

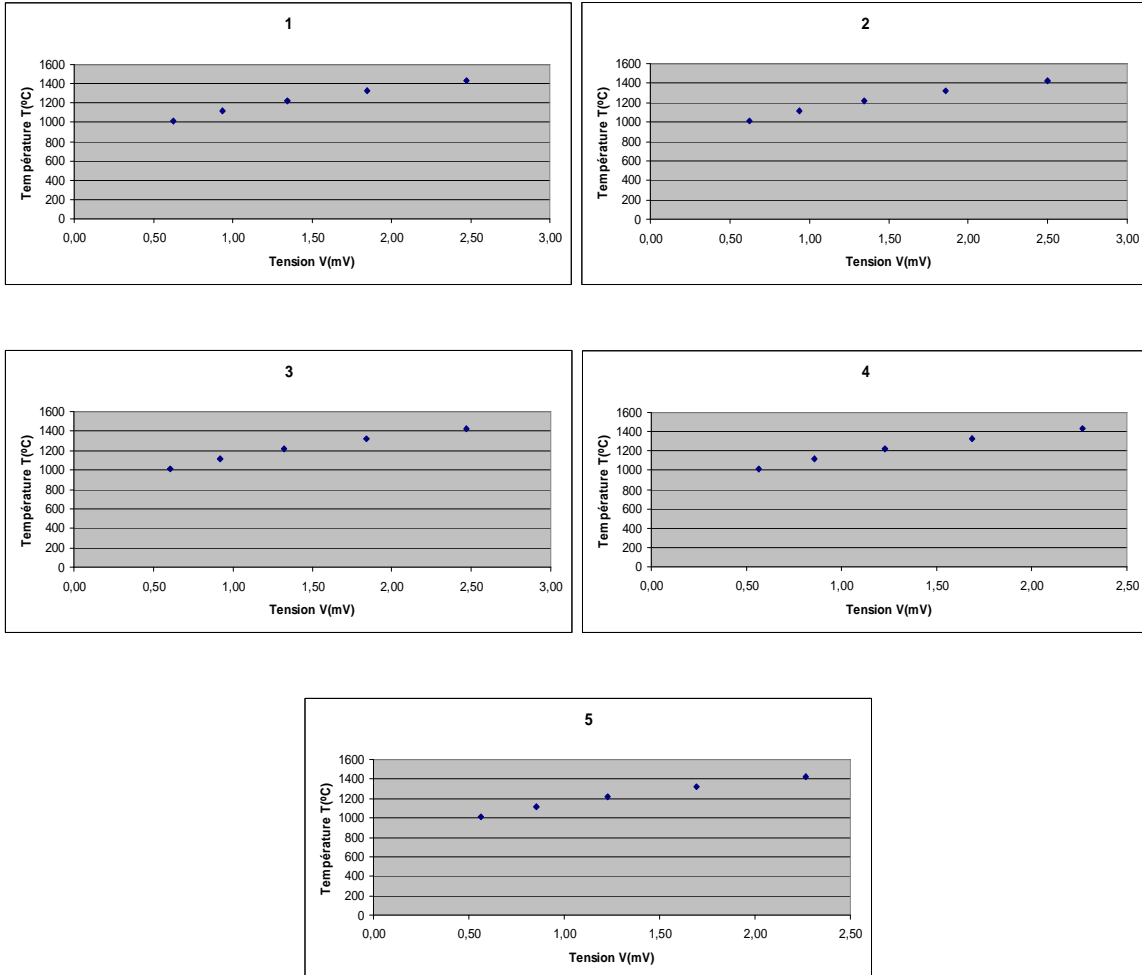


Figure 12 : Données T-V. Filtre 4 pour chaque jour.



Filtre 5 :

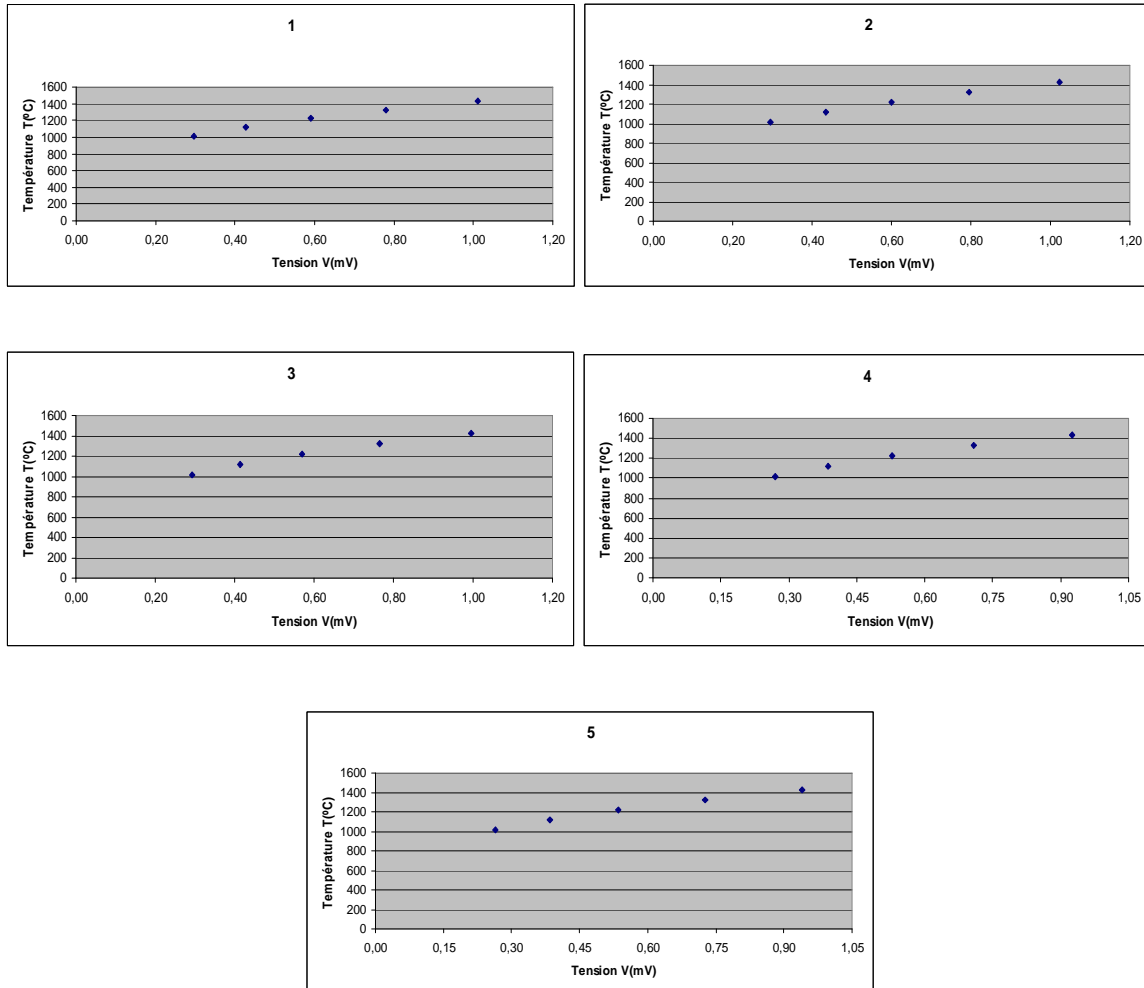
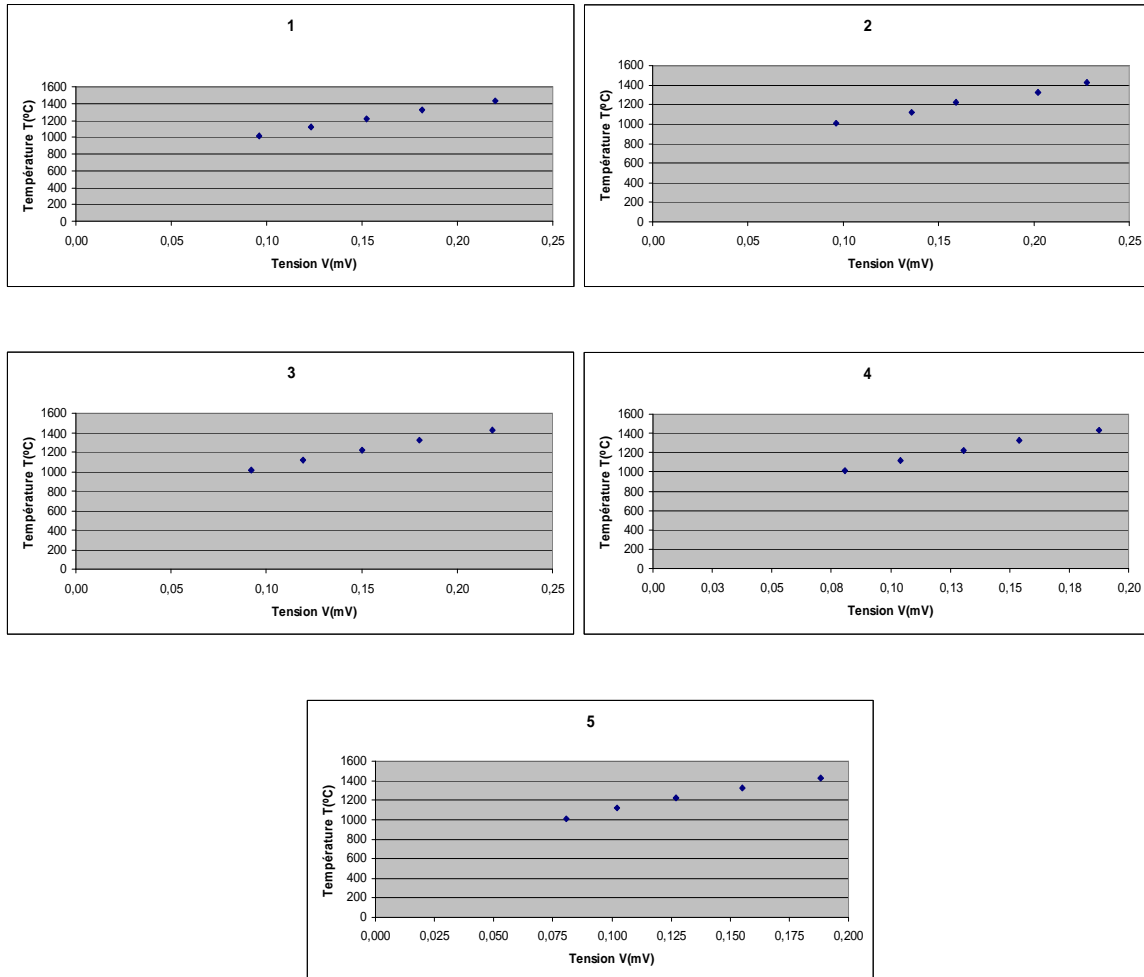


Figure 13 : Données T-V. Filtre 5 pour chaque jour.

**Filtre 6 :**



**Figure 14 : Données T-V. Filtre 6 pour chaque jour.**

On peut vérifier que pour tous les filtres les résultats sont pareils.

## ANNEXE C: Graphiques avec les courbes de tendance possibles pour un filtre

Ce sont ici les courbes de tendance que nous avons obtenues pour le filtre un : linéaire, polynôme d'ordre deux, polynôme d'ordre trois, exponentielle, potentielle et logarithmique avec leurs correspondants  $R^2$ .

Linéaire :

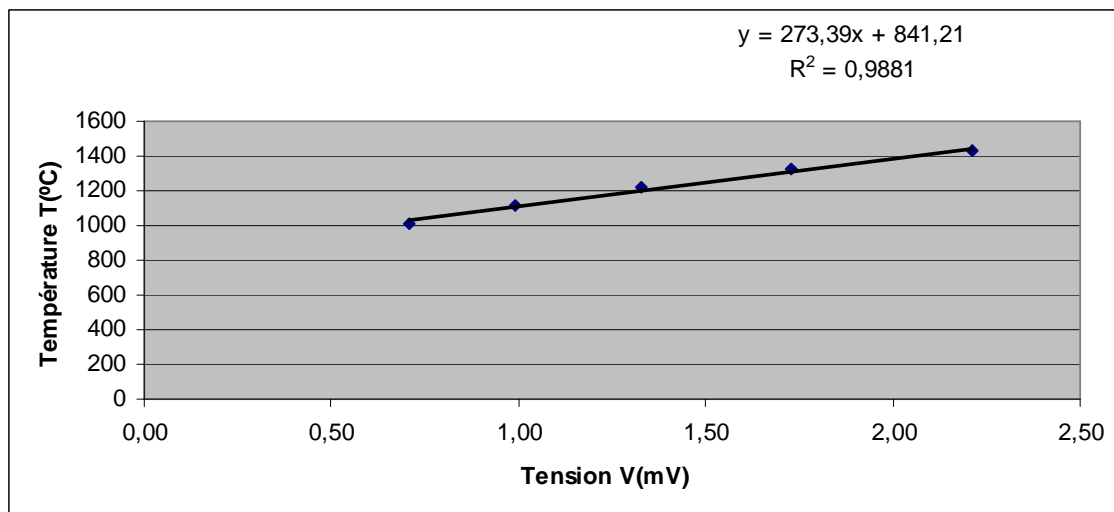


Figure 15 : Courbe de tendance linéaire. Formule et  $R^2$

Polynôme d'ordre deux:

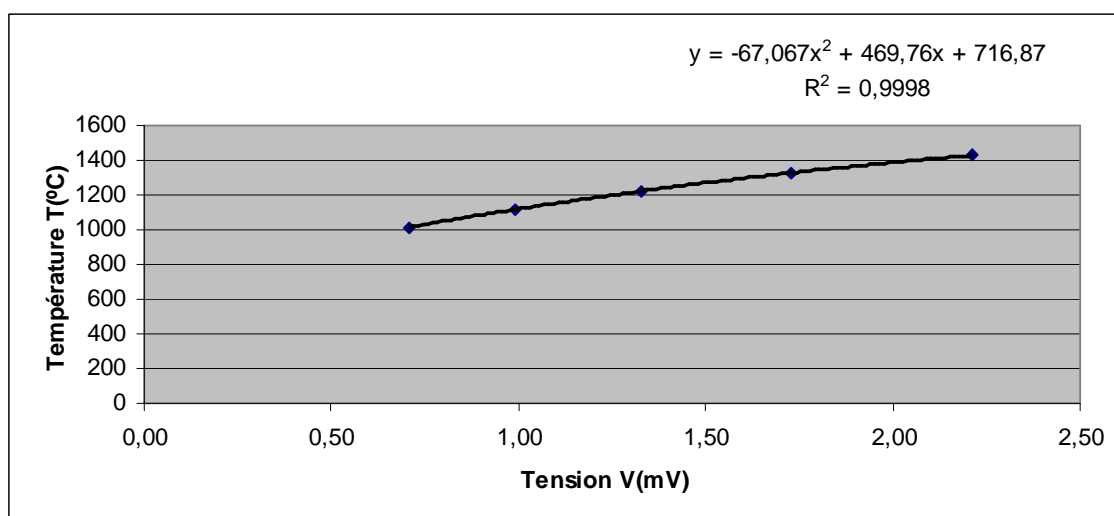


Figure 16 : Courbe de tendance polynôme d'ordre deux. Formule et  $R^2$

Polynôme d'ordre trois:

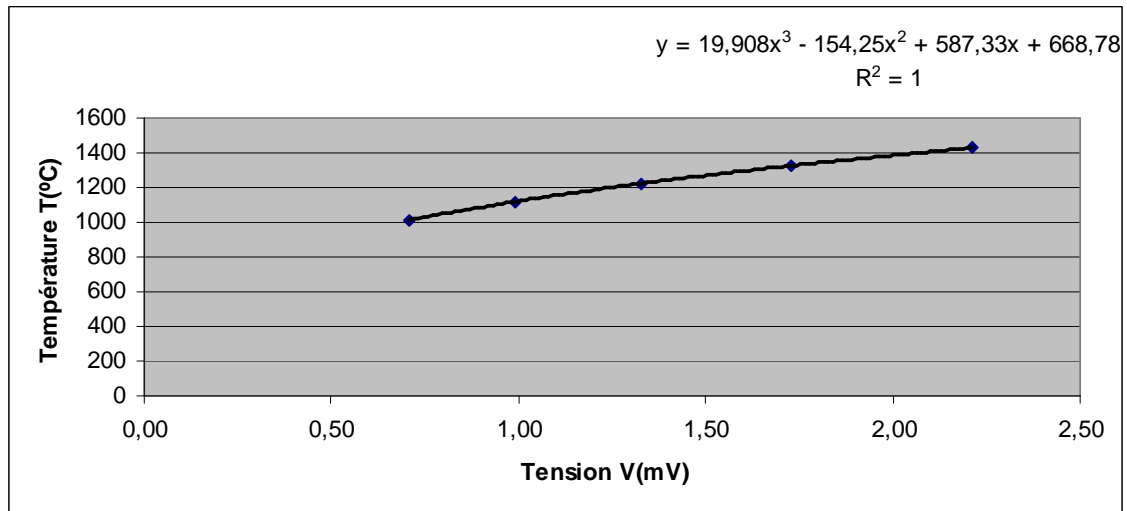


Figure 17 : Courbe de tendance polynôme d'ordre trois. Formule et  $R^2$

Exponentielle :

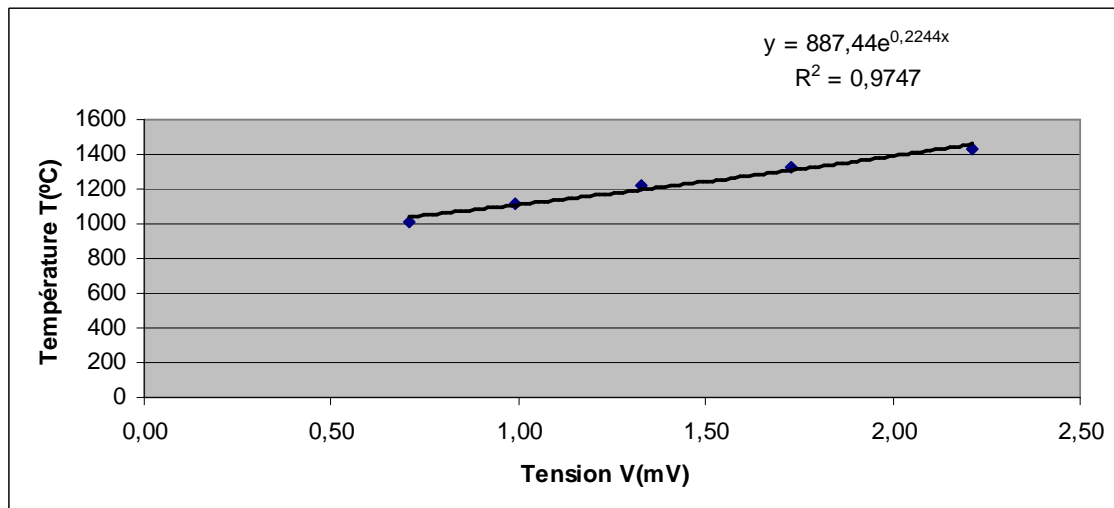


Figure 18 : Courbe de tendance exponentielle. Formule et  $R^2$

Potentielle :

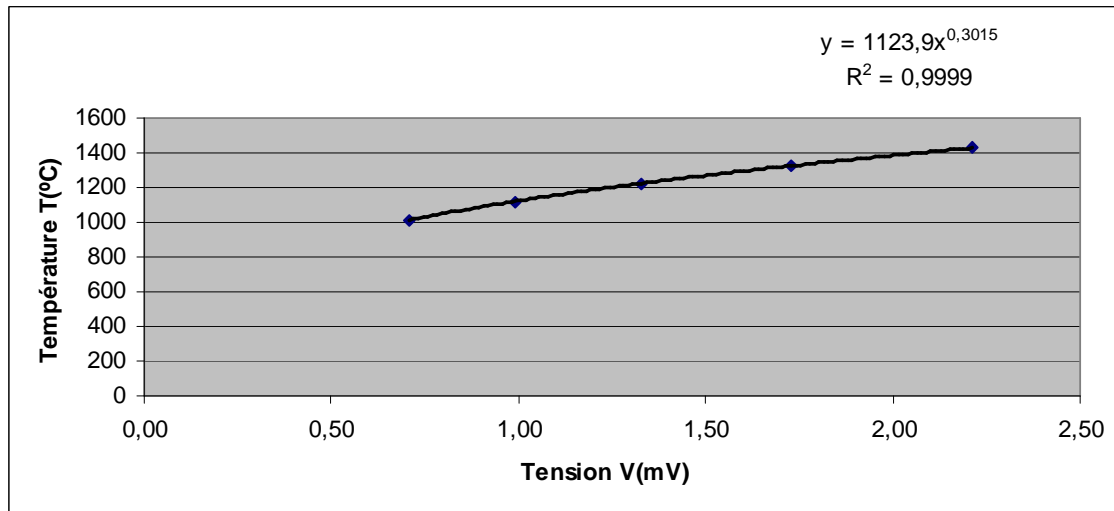


Figure 19 : Courbe de tendance potentielle. Formule et  $R^2$

Logarithmique :

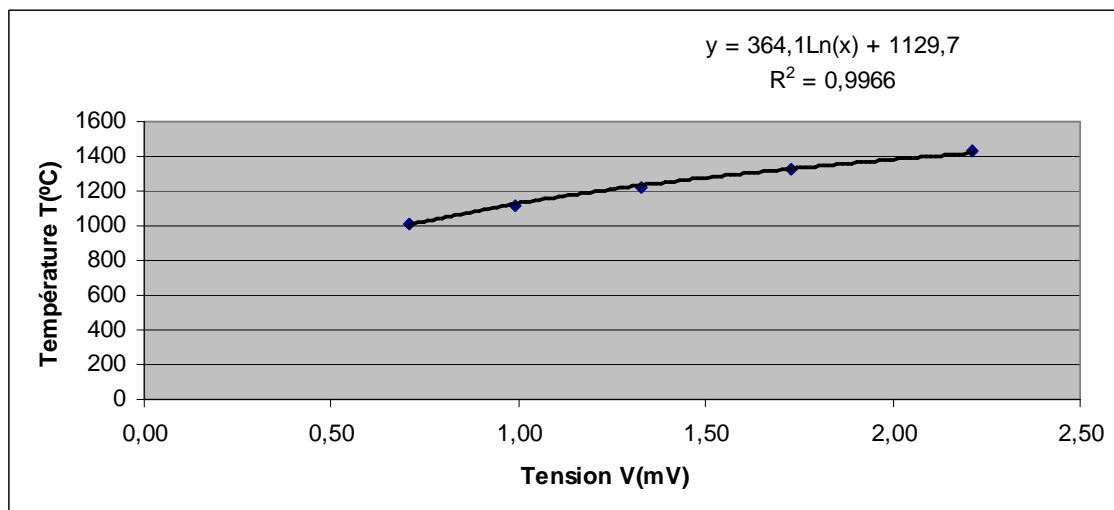


Figure 20 : Courbe de tendance logarithmique. Formule et  $R^2$

Comme on peut voir la courbe qui s'adapte mieux aux données est la d'ordre trois. Les autres courbes ont un  $R^2$  qui n'arrive pas à 1.

## ANNEXE D: Formules des courbes de troisième ordre pour chaque filtre

Filtre 1:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 19,908[\text{V (mV)}]^3 - 154,25[\text{V (mV)}]^2 + 587,33[\text{V (mV)}] + 668,78$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 15,579[\text{V (mV)}]^3 - 133,35[\text{V (mV)}]^2 + 552,59[\text{V (mV)}] + 686,72$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 31,769[\text{V (mV)}]^3 - 201,22[\text{V (mV)}]^2 + 638,43[\text{V (mV)}] + 661,62$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 29,866[\text{V (mV)}]^3 - 199,65[\text{V (mV)}]^2 + 660,19[\text{V (mV)}] + 664,81$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 36,098[\text{V (mV)}]^3 - 221,80[\text{V (mV)}]^2 + 683,13[\text{V (mV)}] + 658,76$$

Filtre 2:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 2,2504[\text{V (mV)}]^3 - 35,241[\text{V (mV)}]^2 + 275,38[\text{V (mV)}] + 682,12$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 2,3736[\text{V (mV)}]^3 - 36,349[\text{V (mV)}]^2 + 275,88[\text{V (mV)}] + 687,31$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 3,4603[\text{V (mV)}]^3 - 45,392[\text{V (mV)}]^2 + 298,40[\text{V (mV)}] + 680,54$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 3,3944[\text{V (mV)}]^3 - 46,161[\text{V (mV)}]^2 + 311,42[\text{V (mV)}] + 681,63$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 4,2333[\text{V (mV)}]^3 - 52,726[\text{V (mV)}]^2 + 326,97[\text{V (mV)}] + 671,47$$

Filtre 3:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 412,27[\text{V (mV)}]^3 - 1382,1[\text{V (mV)}]^2 + 2201,6[\text{V (mV)}] + 588,45$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 1214,3[\text{V (mV)}]^3 - 2654,6[\text{V (mV)}]^2 + 2715,8[\text{V (mV)}] + 533,98$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 654,51[\text{V (mV)}]^3 - 1633,6[\text{V (mV)}]^2 + 2137,3[\text{V (mV)}] + 647,74$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = -811,1[\text{V (mV)}]^3 - 918,58[\text{V (mV)}]^2 + 2272,6[\text{V (mV)}] + 650,95$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 2520,4[\text{V (mV)}]^3 - 4111,1[\text{V (mV)}]^2 + 3221,9[\text{V (mV)}] + 550,09$$

Filtre 4:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 22,245[\text{V (mV)}]^3 - 157,70[\text{V (mV)}]^2 + 533,58[\text{V (mV)}] + 737,88$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 23,205[\text{V (mV)}]^3 - 163,06[\text{V (mV)}]^2 + 539,80[\text{V (mV)}] + 736,24$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 25,262[\text{V (mV)}]^3 - 170,76[\text{V (mV)}]^2 + 546,25[\text{V (mV)}] + 741,21$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 26,028[\text{V (mV)}]^3 - 175,99[\text{V (mV)}]^2 + 567,22[\text{V (mV)}] + 744,32$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 30,563[\text{V (mV)}]^3 - 193,98[\text{V (mV)}]^2 + 586,94[\text{V (mV)}] + 739$$

Filtre 5:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 266,51[\text{V (mV)}]^3 - 826,99[\text{V (mV)}]^2 + 1287,7[\text{V (mV)}] + 697,67$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 226,34[\text{V (mV)}]^3 - 716,6[\text{V (mV)}]^2 + 1190,2[\text{V (mV)}] + 718,44$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 447,32[\text{V (mV)}]^3 - 1210,7[\text{V (mV)}]^2 + 1537,7[\text{V (mV)}] + 657,44$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 414,05[\text{V (mV)}]^3 - 1159,7[\text{V (mV)}]^2 + 1532,5[\text{V (mV)}] + 675,71$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 531,12[\text{V (mV)}]^3 - 1314,9[\text{V (mV)}]^2 + 1561[\text{V (mV)}] + 682,56$$

Filtre 6:

$$T (^{\circ}\text{C}) = -39626[\text{V (mV)}]^3 + 12529[\text{V (mV)}]^2 + 2516,8[\text{V (mV)}] + 691,53$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 36053[\text{V (mV)}]^3 - 15833[\text{V (mV)}]^2 + 5282,4[\text{V (mV)}] + 618,06$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = -20916[\text{V (mV)}]^3 + 4376,6[\text{V (mV)}]^2 + 3522,7[\text{V (mV)}] + 669,41$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = -88300[\text{V (mV)}]^3 + 27961[\text{V (mV)}]^2 + 1391[\text{V (mV)}] + 767,65$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 34542[\text{V (mV)}]^3 - 24368[\text{V (mV)}]^2 + 8432,6[\text{V (mV)}] + 474,83$$

## ANNEXE E: Tableaux de températures pour les mesures aléatoires.

Ici, on peut trouver les résultats théoriques pour chaque température aléatoire du dernier jour et las moyennes pour chaque filtre.

Température (°C)		1085					
Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Jour	J1	1060,42	1052,32	1033,50	1066,51	1071,59	1022,75
	J2	1061,47	1055,85	1039,96	1066,92	1069,48	1018,90
	J3	1070,10	1066,52	1067,05	1073,22	1080,34	1038,50
	J4	1091,29	1086,79	1122,34	1089,77	1101,92	1091,14
	J5	1092,59	1088,19	1111,49	1091,04	1104,13	1101,58
Moyenne		1075,17	1069,94	1074,87	1077,49	1085,49	1054,58

**Tableau 11. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1085°C**

Température (°C)		1170					
Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Jour	J1	1158,99	1150,61	1148,05	1164,92	1164,94	1133,10
	J2	1158,19	1152,69	1154,66	1164,90	1159,62	1108,22
	J3	1166,87	1163,17	1170,70	1170,37	1176,37	1145,52
	J4	1193,61	1189,00	1240,65	1191,30	1200,53	1215,56
	J5	1194,24	1190,14	1226,63	1191,92	1197,65	1224,55
Moyenne		1174,38	1169,12	1188,14	1176,68	1179,82	1165,39

**Tableau 12. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1170°C**



Température (°C)		1250					
Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Jour	J1	1244,51	1233,93	1241,56	1248,37	1244,40	1224,46
	J2	1242,89	1234,37	1243,25	1247,40	1237,55	1181,84
	J3	1249,33	1243,46	1254,13	1251,79	1254,68	1232,58
	J4	1280,90	1273,95	1331,34	1276,68	1281,49	1315,07
	J5	1280,64	1274,19	1313,20	1275,94	1274,12	1314,95
Moyenne		1259,65	1251,98	1276,70	1260,04	1258,45	1253,78

**Tableau 13. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1250°C**

Température (°C)		1348					
Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Jour	J1	1316,00	1307,10	1288,01	1323,74	1330,95	1277,00
	J2	1314,03	1305,84	1285,65	1321,39	1323,78	1226,84
	J3	1318,32	1313,74	1295,26	1324,97	1337,86	1282,63
	J4	1353,54	1347,98	1373,11	1353,70	1367,47	1368,79
	J5	1353,08	1347,78	1354,42	1352,01	1357,70	1364,63
Moyenne		1331,00	1324,49	1319,29	1335,16	1343,55	1303,98

**Tableau 14. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1348°C**

Température (°C)		1388					
Filtre		F1	F2	F3	F4	F5	F6
Jour	J1	1339,38	1331,64	1305,83	1349,67	1350,62	1292,60
	J2	1337,27	1329,78	1301,65	1346,77	1343,56	1240,91
	J3	1341,22	1337,57	1311,00	1350,29	1356,90	1297,55
	J4	1377,45	1372,93	1388,37	1380,41	1387,00	1383,98
	J5	1377,23	1372,91	1370,04	1378,82	1377,57	1379,30
Moyenne		1354,51	1348,97	1335,38	1361,19	1363,13	1318,87

**Tableau 15. Températures extrapolées à partir des valeurs de tension du tableau 2 pour 1388°C**

## ANNEXE F: Erreur absolues et relatives.

		ERREURS ABSOLUES						
		FILTRE	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<b>TEMPERATURE (°C)</b>	1085		24,58	32,68	51,50	18,49	13,41	62,25
			23,53	29,15	45,04	18,08	15,52	66,10
			14,90	18,48	17,95	11,78	4,66	46,50
			6,29	1,80	37,34	4,77	16,92	6,14
			7,59	3,19	26,49	6,04	19,13	16,58
	1170		11,01	19,39	21,95	5,08	5,06	36,90
			11,81	17,31	15,34	5,10	10,38	61,78
			3,13	6,83	0,70	0,37	6,37	24,48
			23,61	19,00	70,65	21,30	30,53	45,56
			24,24	20,14	56,63	21,92	27,65	54,55
	1250		5,49	16,07	8,44	1,63	5,60	25,54
			7,11	15,63	6,75	2,60	12,45	68,16
			0,67	6,54	4,13	1,79	4,68	17,42
			30,90	23,95	81,34	26,68	31,49	65,07
			30,64	24,19	63,20	25,94	24,12	64,95
	1348		32,00	40,90	59,99	24,26	17,05	71,00
			33,97	42,16	62,35	26,61	24,22	121,16
			29,68	34,26	52,74	23,03	10,14	65,37
			5,54	0,02	25,11	5,70	19,47	20,79
			5,08	0,22	6,42	4,01	9,70	16,63
	1388		48,62	56,36	82,17	38,33	37,38	95,40
			50,73	58,22	86,35	41,23	44,44	147,09
			46,78	50,43	77,00	37,71	31,10	90,45
			10,55	15,07	0,37	7,59	1,00	4,02
			10,77	15,09	17,96	9,18	10,43	8,70

Tableau 16. Tableau des erreurs absolues selon la température réelle du dernier jour.

Ci-dessous c'est la table avec les erreurs relatives par température et filtre.

		ERREURS ABSOLUES						
		FILTRE	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<b>TEMPERATURE (°C)</b>	1085		0,0227	0,0301	0,0475	0,0170	0,0124	0,0574
			0,0217	0,0269	0,0415	0,0167	0,0143	0,0609
			0,0137	0,0170	0,0165	0,0109	0,0043	0,0429
			0,0058	0,0017	0,0344	0,0044	0,0156	0,0057
			0,0070	0,0029	0,0244	0,0056	0,0176	0,0153
	1170		0,0094	0,0166	0,0188	0,0043	0,0043	0,0315
			0,0101	0,0148	0,0131	0,0044	0,0089	0,0528
			0,0027	0,0058	0,0006	0,0003	0,0054	0,0209
			0,0202	0,0162	0,0604	0,0182	0,0261	0,0389
			0,0207	0,0172	0,0484	0,0187	0,0236	0,0466
	1250		0,0044	0,0129	0,0068	0,0013	0,0045	0,0204
			0,0057	0,0125	0,0054	0,0021	0,0100	0,0545
			0,0005	0,0052	0,0033	0,0014	0,0037	0,0139
			0,0247	0,0192	0,0651	0,0213	0,0252	0,0521
			0,0245	0,0194	0,0506	0,0208	0,0193	0,0520
	1348		0,0237	0,0303	0,0445	0,0180	0,0127	0,0527
			0,0252	0,0313	0,0463	0,0197	0,0180	0,0899
			0,0220	0,0254	0,0391	0,0171	0,0075	0,0485
			0,0041	0,0000	0,0186	0,0042	0,0144	0,0154
			0,0038	0,0002	0,0048	0,0030	0,0072	0,0123
	1388		0,0350	0,0406	0,0592	0,0276	0,0269	0,0687
			0,0365	0,0419	0,0622	0,0297	0,0320	0,1060
			0,0337	0,0363	0,0555	0,0272	0,0224	0,0652
			0,0076	0,0109	0,0003	0,0055	0,0007	0,0029
			0,0078	0,0109	0,0129	0,0066	0,0075	0,0063

**Tableau 17. Tableau des erreurs relatives selon la température réelle du dernier jour.**

Afin de simplifier les résultats on a calculé la moyenne des erreurs par filtre et après le pourcentage.

FILTRES	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Erreur relative	0,0109	0,0122	0,0236	0,0084	0,0102	0,0314
%	1,09	1,22	2,36	0,84	1,02	3,14

**Tableau 18. Tableau des moyennes des erreurs relatives selon chaque filtre.**

## ANNEXE G: Exemples des essais de mesures.

Le but de ce projet est de mesurer les températures de la paroi d'un foyer de combustion, alors dans cette annexe nous avons rédigé quelques exemples aléatoires pour clarifier la manière d'utiliser ce rapport. Est présentée ici pas à pas la solution pour obtenir la température.

Données de la mesure : Filtre 2

Tension : 3,15 mV

Nous allons sur l'annexe D et on peut voir les formules (cinq) pour le filtre 2

Nous obtenons cinq températures : 1270°C, 1270°C, 1278°C, 1311°C et 1311°C

Nous calculons la moyenne : 1288°C

Nous allons au tableau 8 et nous choisissons l'erreur pour le filtre 2 : 1,22%

Résultat final : 1288°C  $\pm$  1,22%, c'est-à-dire : [1272,28 < T < 1303,71]

Ensuite on peut voir les résultats pour quelques autres exemples. C'est inclus ce que nous avons fait.

Tension (mV)	1,1173	0,22	0,38	3,15	0,87
Filtre	F1	F3	F5	F2	F4
Températures (°C)	1175,6	1051,33	1096,34	1287,91	1108,72
erreurs (%)	1,09	2,36	1,02	1,22	0,84

**Tableau 19. Tableau des exemples pour une valeur de tension aléatoire.**

## ANNEXE H: Recherche des fournisseurs de fluxmètre

Pour compléter la formation l'objectif était de trouver un fournisseur de fluxmètres afin de le choisir, il était nécessaire de concevoir une liste des spécifications précise, d'expliquer la géométrie de notre installation et de définir rigoureusement notre besoin. Le fluxmètre nous servira pour calculer le flux autour de la paroi intérieure d'un foyer de combustion.

Nous nous sommes concentrés notamment sur la température de la paroi intérieure pour définir les limites du fluxmètre. Nous savons que les températures auxquelles le fluxmètre doit résister peuvent atteindre environ 700°C quand il y a la flamme parce que nous avons utilisé des thermocouples de type K dont les deux brins sont soudés séparément sur la paroi interne (au centre, à environ 25 cm du haut de la chambre de combustion).

Nous savons, parce qu'on a fait une analyse sur la paroi extérieure avec thermocouples de contact, que l'ordre de grandeur du flux pour 300°C est 3,5 kW/ m<sup>2</sup>. Par conséquent nous avons estimé que pour une température d'environ 700°C il est possible d'utiliser un fluxmètre dont la gamme de mesure est de l'ordre de 10-50 kW/m<sup>2</sup>. Ainsi nous pouvons assurer que nos spécifications seront respectées.

Nous avons examiné plusieurs manières de fixer le fluxmètre. Dans la veine il y a des bouchons de métal qui la traversent. Si le fluxmètre est cylindrique nous pourrions l'introduire dans un bouchon percé d'un trou de 3 mm de diamètre (nous avons la possibilité de ré-usiner le trou du bouchon pour accueillir un fluxmètre de diamètre plus important si nécessaire), ou alors directement dans le hublot utilisé pour mettre le bouchon, auquel cas le fluxmètre devra être fileté avec 29 mm de diamètre.

Sinon on peut aussi utiliser un fluxmètre plan en le fixant au bouchon juste au niveau de la paroi intérieure (le problème qui risque de se poser est la fonte des câbles du fluxmètre).

Il faut alors trouver un fournisseur capable de nous procurer un fluxmètre résistant à la température que nous avons précisé.

## Recherche et choix de fournisseurs

Pour ce faire, j'ai consulté différents sites Internet d'entreprises susceptibles de pouvoir nous fournir un fluxmètre pour nous aider dans deux objectifs :

1.- Un premier objectif de mesure: flux de chaleur total, température de surface et des régions voisines, mesure de la vitesse dans ces régions, et pour finir estimation du flux de chaleur par convection à partir de corrélations.

2.- Une fois atteint l'objectif précédent, l'étape suivante consisterait à mesurer le flux radiatif et le différencier de celui convectif à l'aide de surfaces d'émissivités différentes (blanc, noir) et comme on sait que la température des deux surfaces est environ la même, le flux convectif serait aussi le même et par conséquent la différence des flux nets nous donnerait le flux radiatif.

Par conséquent, pour faire la proposition aux différents fournisseurs nous avons dû être assez spécifiques: donner les détails d'utilisation, la température de travail, etc.

J'ai cherché sur le tableau des capteurs thermiques de différentes entreprises du rapport de Carlos Higuera [6] et aussi en cherchant sur Internet j'en ai trouvé d'autres pour avoir différents fournisseurs et ainsi obtenir le meilleur devis.

Voici les entreprises que j'ai contactées :

### 1) CAPTEC (Lille, France)

La spécialité de Captec est la fabrication sur mesure de capteurs de flux thermique (fluxmètres thermiques et radiatifs) :

- capteurs de flux thermique
- capteur infra rouge,

- capteurs de flux conductif, convectif et radiatif,
- radiomètre
- thermocouples
- fluxmètres thermiques
- échangeur de chaleur
- sonde Infrarouge

## 2) HUKSEFLUX (Holland)

Sa principale activité est le design, fabrication et aussi l'étalonnage de :

- Capteurs de mesure de flux de chaleur
- Capteurs de radiation solaire
- Pyranomètres

## 3) VATELL (Virginia, États Unis)

Ils ont trois lignes de produits :

- Capteurs de flux thermique
- Microcapteurs
- Thermogage

## 4) IPSEN (Allemagne)

Ils ont une filiale à Evry, France :

Les produits offerts par IPSEN sont utilisés pour un traitement individuel dans des fours à une chambre jusqu'à la production à grande échelle dans des installations intégrées

IPSEN fournit ses équipements à des entreprises des secteurs automobile, aéronautique et aérospatial ainsi qu'à l'industrie mécanique et à l'industrie de construction des machines-outils, mais aussi à des ateliers commerciaux de traitement thermique à façon.

IPSEN a dominé et développé le progrès dans le domaine du traitement thermique

## 5) MEDTHERM (Alabama, États Unis)

MEDTHERM Corporation est un important fabricant de capteurs de flux de chaleur et du rayonnement infrarouge, thermocouples de réponse rapide, et de thermocouples haute température pour des vols aérospatiaux et des essais au sol, des essais au feu, des essais d'inflammabilité des matériaux et des essais ISO.

Nous avons eu beaucoup de problèmes pour trouver un fournisseur qui s'adapte à nos besoins, puisque beaucoup de ces fluxmètres ne résistaient pas à 700°C. Par exemple Captec nous a répondu que les siens supportent 200°C maximum. Par ailleurs certains contacts n'existent plus. Donc on a perdu beaucoup de temps pour trouver des informations et surtout d'information véritable. Par exemple j'ai essayé de joindre les contacts de Vatell en Angleterre à travers le site web : [www.sequoia.co.uk](http://www.sequoia.co.uk) (distributeur de Vatell en Europe) dont les contacts étaient : [cathryn.walker@sequoia.co.uk](mailto:cathryn.walker@sequoia.co.uk) et [simon.thornton@sequoia.co.uk](mailto:simon.thornton@sequoia.co.uk) pourtant je n'ai pas reçu réponse et le email pour la première personne a été refusé directement, donc à la fin j'ai essayé de joindre Vatell aux États-Unis [mkt@vatell.com](mailto:mkt@vatell.com) et voilà la réponse. La personne avec laquelle on devait contacter en Europe était : [nick.lidington@sequoia.co.uk](mailto:nick.lidington@sequoia.co.uk). Il nous a répondu avec précision sur ce que nous avons demandé en décrivant les différentes géométries pour fixer le fluxmètre et les possibles solutions à ce faire. À la fin il nous a proposé trois types de fluxmètres

- HFM6 D-H – 850 °C avec RTS tempsensor
- HFM7 E-H – 700 °C avec RTS tempsensor
- HFM8 E-H – 700 °C avec thermocouple tempsensor

Ensuite nous avons répondu en rédigeant ce que nous étions intéressés à partir de sa proposition et il nous a mis en contact avec le directeur technique dont l'e-mail est [John.Culver@sequoia.co.uk](mailto:John.Culver@sequoia.co.uk) qui nous a proposé l'idée de refroidir le fluxmètre si c'est nécessaire et nous a spécifié un peu plus sur quelques doutes sur la géométrie final.



Dans ce moment nous avons presque toute l'information nécessaire, donc après une réunion nous avons décidé écarter le fluxmètre HFM6 puisque nous n'avons pas besoin d'atteindre cette température pour les premières estimations en utilisant le fluxmètre. Peut-être dans un futur, pour continuer avec notre travail ce sera nécessaire de nous fournir avec celui, mais pas pour l'instant. Ce que nous avons fait pour suivre notre commande est demander les différences entre les autres deux fluxmètres puisque apparemment il n'en y a pas et finalement pour savoir le prix des autres deux.

Une fois reçue la réponse nous pouvons dire que la différence entre eux est la manière de mesurer.

- Le HFM-7 E-H utilise un RTS (capteur de température). La sortie de ce capteur change son résistance électrique quand la température change préalablement.

- Le HFM-8 E-H utilise un thermocouple comme capteur de température. La sortie de ce capteur change sa tension quand la température change préalablement.

Afin de compléter la commande nous avons reçu un dernier e-mail avec le devis :

Le prix pour chacun est de 4724 €.

Nous souhaitons que cette annexe serve pour avoir une idée de la procédure pour chercher et trouver un objet dont nous avons besoin et aussi pour faciliter le début à ce qui fasse les futures mesures avec un fluxmètre dans le foyer de combustion.

## **ANNEXE I: Recherche des fournisseurs de peinture.**

Afin de compléter ce projet, l'objectif était essayer de trouver un fournisseur de peinture pour peindre la paroi du foyer de combustion afin d'utiliser une caméra infrarouge et ainsi de mesurer la température.

Comme il a déjà été expliqué précisément dans l'annexe précédente comment faire la recherche des fournisseurs, on va expliquer ici les détails importants pour caractériser la commande de peinture et les sites web susceptibles de nous en fournir.

Pour préciser la commande on doit définir notre but, expliquer que nous voulons la peinture pour utiliser une caméra infrarouge et par conséquent nous souhaiterions acquérir une peinture adaptée.

Ensuite on doit caractériser que la peinture doit être peinture d'haute émissivité spectrale qui soit uniforme pour une bande entre 3 et 5  $\mu\text{m}$ . Il est nécessaire de préciser la température à laquelle nous allons travailler (environ 700°C) et si l'émissivité varie jusqu'à atteindre cette température. On doit connaître aussi si l'émissivité est totale ou spectrale directionnelle. Nous devons savoir si l'épaisseur de la couche de peinture peut éviter irrégularités dans la paroi et finalement le prix.

Les entreprises que nous avons trouvées comme fournisseurs de peinture à haute émissivité pour travailler aux hautes températures sont :

- Halfords en Angleterre : [www.halfords.com](http://www.halfords.com)
- Tempil aux États-Unis : [www.tempil.com](http://www.tempil.com)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] GRISCH F., GICQUEL P. & HERVÉ P., Description of the different ways to measure the temperature close to a flame. *Mesures de températures dans les gaz et les flammes*, Revue : techniques de l'ingénieur. Vol. RC3 : Réf. R2752, 10 septembre 2009
- [2] CHEREL C. Rapport de Projet de Fin d'Études (combustion sans flamme): Rapport Master Coria, projet STREAM. Rouen : INSA Rouen, Département mécanique, 2006, 82 p.
- [3] MIN J., Rapport de stage à CORIA, *Stabilisation et transitions de flammes de jets non-prémélangés de méthane et d'air dilué en CO<sub>2</sub>*, Rouen : INSA de Rouen, 2006-2007, 55 p.
- [4] THUREAU P., Description of the different types of thermal fluxmeters. *Fluxmètres thermiques*, Revue : techniques de l'ingénieur. Réf. R2900, 10 octobre 2006
- [5] BARDON J.P., CASSAGNE B., How to measure the surface wall temperature. *Température de surface, mesure par contact*. Revue : techniques de l'ingénieur, traité mesures et contrôle, Réf. R2730, 1998
- [6] HIGUERA C., Rapport de stage à CETHIL. *Etude thermique d'un foyer de combustion non prémélangée*, Lyon : INSA de Lyon, septembre 2009, 119 p.
- [7] MIN J., BAILLOT F., WYZGOLIK A., DOMINGUES E., TALBAUT M., PATTE-ROULAND B., GALIZZI C. *Impact of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> or Ar on flame stability & inner structure*. Rouen: CORIA, Lyon: CETHIL, France, 2009, 39 p.
- [8] LAMIGE S., *Effect of the reactant preheating on the stability of non-premixed methane/air flames*. International Heat Transfer Conference IHTC14, 2010, Washington D.C. 2010, 6 p.
- [9] HUBERT F., Rapport de Stage de Master Recherche MEGA, *Mesure de température par voie spectroscopique*. Lyon : INSA de Lyon, Septembre 2009, 58 p.
- [10] DUGRAVOT L., Rapport de PFE à CETHIL. *Étude et mise au point d'un dispositif expérimental de caractérisation de milieux en combustion*. Lyon: INSA de Lyon, Juin 2007, 45 p.
- [11] DURY M. R., THEOCHAROUS T., HARRISON N., FOX N., HILTON M., Compilation of the optical properties of materials used in optical systems. *Common black coatings: reflectance and ageing characteristics in the 0.32-14.3 μm wavelength range*. August 2006
- [12] DELMAS A., VAILLON R., Théorie sur rayonnement. *Echanges de chaleur par rayonnement entre corps opaques à travers un milieu transparent*. Version 4, 200