



HAL
open science

Développement d'un dispositif de calorimétrie par rayonnement thermique : application à la mesure des pertes dans les composants électriques

Elysée Obame Ndong

► **To cite this version:**

Elysée Obame Ndong. Développement d'un dispositif de calorimétrie par rayonnement thermique : application à la mesure des pertes dans les composants électriques. Energie électrique. Université de Grenoble, 2010. Français. NNT : 2010GRENOBLE5080 . tel-00523756

HAL Id: tel-00523756

<https://theses.hal.science/tel-00523756>

Submitted on 6 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

N° attribué par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'Université de Grenoble
délivré par l'Institut polytechnique de Grenoble**

Spécialité : « Génie Electrique »

préparée au laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab)

dans le cadre de l'**Ecole Doctorale** « *Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du*

Signal (EEATS) »

présentée et soutenue publiquement

par

Elysée OBAME NDONG

le Vendredi 10 Septembre 2010

***Développement d'un dispositif de calorimétrie par
rayonnement thermique : application à la mesure
des pertes dans les composants électriques***

DIRECTEUR DE THESE : Alain SYLVESTRE

CO-DIRECTEUR(S) DE THESE : Frédéric AITKEN et Olivier GALLOT-LAVALLEE

JURY

Mme. Aline AUROUX	, Examineur (DR CNRS Lyon)
Mr. Jean-Christophe BATSALE	, Rapporteur (PR ENSAM Bordeaux)
Mr. Philippe CAMUS	, Examineur (IR CNRS Grenoble)
Mr. Didier DELAUNAY	, Rapporteur (DR CNRS Nantes)
Mr. Jean Paul FERRIEUX	, Examineur (PR UJF Grenoble)
Mr. Jean-Pierre GROLIER	, Examineur (PR UBP Clermont)
Mr. Frédéric AITKEN	, Co-Directeur de thèse (CR CNRS)
Mr. Olivier GALLOT-LAVALLEE	, Co-Directeur de thèse (MCF UJF)

A mon Père Francis NDONG ENGO

A ma Mère Henriette NDZOUYOU AKIGUE

A ma Femme Sérangé OBAME-NDONG

A ma grande sœur Peggy MEZOGHO

Avant propos

Le travail présenté dans ce mémoire à été réalisé au G2elab (Grenoble Electrical Engineering Laboratory) en collaboration avec le Service d'Etude et de Réalisation d'Appareillage Scientifique de l'Institut Néel (SERAS).

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Olivier Gallot-Lavallée, Maître de Conférences à l'Université de Grenoble pour m'avoir encadré et guidé tout au long de mes travaux. J'ai apprécié sa rigueur, son objectivité et son humanité concernant sa compréhension et sa bienveillance.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Frédéric Aitken Chargé de Recherche au G2elab-CNRS pour son encadrement et ces précieux conseils scientifiques. Son omniprésence a été pour moi un véritable moteur dans l'évolution de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Messieurs Philippe Jeantet Chef de Service SERAS, Emmanuel Roy Chef du Bureau d'étude, Patrick Trévisson, Gilles Pont, Grégor Kapoujyan, Pierre Hostachy et Gilles Perroux du SERAS pour leur fructueuse collaboration à la réalisation de ce projet.

Merci à Monsieur Jean-Luc Garden Ingénieur de recherche à l'Institut Néel, Edouard Wagner et Valérie Reita tous deux ITA au pôle Optique de l'Institut Néel pour leurs précieux conseils sur les capteurs de température et sur les fibres optiques.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Messieurs Jean-Christophe Batsale Professeur à l'ESSAM – Laboratoire TREFLE de Bordeaux et Didier Delaunay Directeur de Recherche au CNRS – Laboratoire de thermocinétique de Nantes pour l'honneur qu'ils m'ont fait de rapporter ce mémoire de thèse.

Je témoigne ma reconnaissance et ma gratitude à Madame Aline Auroux Directeur de Recherche à l'Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon et Messieurs Jean Pierre Grolier Professeur Emérite à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, Jean-Paul Ferrieux Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble et Philippe Camus Ingénieur de recherche à l'Institut Néel pour avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Que l'ensemble du pôle technique de l'équipe MDE du G2elab, en l'occurrence Messieurs Alain Tisserand, Jean-Luc Palenzuela, Christophe Pollet, Jean-Paul Baroux et Lucien Saragossi, soit assuré de ma profonde reconnaissance pour les nombreux services rendus.

Merci à Madame Nelly Bonifaci Chef d'équipe MDE au G2elab et à Monsieur Olivier Lesaint Directeur Adjoint du G2elab pour leur éclairage sur mon exposé.

Je remercie mes amis Tran Van Hoan, Minh Nguyen Ngoc, Samir Amarhar, Abdelkader Khaouli et Lucian Caliap pour toutes les bonnes choses que nous avons eu à partager durant les trois années de ma thèse.

Je ne saurais finir sans remercier ma douce et tendre épouse Sérance Obame-Ndong pour sa patience et son soutien sans lesquels je ne pouvais sereinement accomplir ce travail.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I Calorimétrie en génie électrique.....	7
1. Introduction.....	9
2. Introduction à la calorimétrie	9
2.1. Principes généraux.....	9
2.2. Méthode adiabatique.....	10
2.2.1. Description	10
2.2.2. Principe de mesure	11
2.3. Méthode quasi-adiabatique ou isopéribolique	12
2.3.1. Description	12
2.3.2. Principe de mesure	12
2.4. Méthode isotherme.....	13
2.4.1. Description	13
2.4.2. Principe de mesure	13
2.5. Méthode à flux de chaleur	14
2.5.1. Description	14
2.5.2. Principe de mesure du flux de chaleur	15
2.6. Comparaison des méthodes.....	16
3. Calorimétrie appliquée au génie électrique	16
3.1. Calorimètres adiabatiques de Ritchie, Szabados et al.	16
3.1.1. Description	16
3.1.2. Principe de mesure	18
3.1.3. Points forts et points faibles	18
3.2. Calorimètre quasi-adiabatique de Cyril Buttay et al.....	18
3.2.1. Description	18
3.2.2. Principe de mesure	19
3.2.3. Points forts et points faibles	20
3.3. Calorimètre isotherme de Seguin et al.	20
3.3.1. Description	20
3.3.2. Principe de mesure	21
3.3.3. Points forts et points faibles	22
3.4. Calorimètre à flux de chaleur de Chen, Sridhar et al.....	22
3.4.1. Principe de mesure	23
3.4.2. Points forts et points faibles	23
3.5. Résumé des caractéristiques métrologiques.....	24
4. Conclusion.....	25
5. Références	26
Chapitre II Description technique du nouveau dispositif expérimental.....	29
1. Introduction.....	31
2. Principe	31
2.1. Méthode de mesure différentielle	31
2.2. Fonctions élémentaires	32
2.3. Synthèse	33
3. Architecture	33
3.1. Système d'isolation	34
3.1.1. Couverture isothermique à faible émissivité et Styrodur®.....	35
3.1.2. Enceinte à vide.....	35
3.1.3. Ecran thermique vertical E	35
3.2. Source de chaleur	36
3.2.1. Corps isotherme.....	36

3.2.2.	Caractéristique de l'objet à tester.....	37
3.3.	Puits de chaleur.....	38
3.4.	Vecteur de chaleur	38
3.4.1.	Ecran thermique horizontal H.....	38
3.4.2.	Support de la cellule de mesure.....	38
3.4.3.	Amenées de courant.....	39
3.5.	Récapitulatif des dimensions des constituants du calorimètre	40
3.6.	Récapitulatif des propriétés des matériaux utilisés.....	40
4.	Instrumentation.....	41
4.1.	Éléments chauffants de la cellule.....	41
4.2.	Capteurs de températures.....	43
4.2.1.	Sondes de platine insérées dans la cellule de mesure	43
4.2.2.	Thermocouples sur écrans thermiques E et H, et enceinte à vide	44
4.3.	Régulateur de température	45
4.4.	Système de levage et d'ouverture	48
4.5.	Groupe de pompage	50
4.6.	Synthèse métrologique.....	51
5.	Conclusion.....	52
6.	Références	53
Chapitre III Etude théorique des transferts de chaleur		55
1.	Introduction.....	57
2.	Notions élémentaires de transfert thermique.....	57
2.1.	Champ de température	57
2.2.	Gradient de température	57
2.3.	Chaleur.....	58
2.4.	Conduction thermique	58
2.5.	Convection thermique	61
2.6.	Rayonnement thermique	62
2.6.1.	Luminance monochromatique et luminance totale	63
2.6.2.	Emittance(ou Exitance) monochromatique et totale.....	64
2.7.	Lois d'émission du rayonnement thermique	64
2.7.1.	Loi de Lambert	64
2.7.2.	Le corps noir	64
2.8.	Emissivité des corps réels.....	66
2.9.	Echange radiatif entre deux surfaces isothermes.....	67
2.9.1.	Surfaces noires	67
2.9.2.	Surfaces grises opaques et diffuses	68
3.	Modélisation des transferts de chaleur du nouveau calorimètre.....	68
3.1.	Hypothèses attenantes au modèle	68
3.2.	Propriétés des matériaux utilisés dans le modèle	72
3.2.1.	Cuivre.....	73
3.2.2.	Constantan.....	74
3.2.3.	Or	75
3.2.4.	Acier inoxydable.....	77
3.2.5.	Epoxy fibre de verre	78
3.2.6.	Styrodur®.....	79
3.3.	Expression des facteurs de forme noirs intervenant dans le modèle	79
3.3.1.	Facteurs de forme S_0-S_{ES} , S_0-S_H et S_H-S_{ES}	79
3.3.2.	Facteurs de forme S_3-S_H , S_3-S_{EI} et S_H-S_{EI}	81
3.4.	Equations du modèle thermique.....	81

3.4.1.	Bilan thermique au composant électrique	82
3.4.2.	Cellule de mesure	82
3.4.3.	Ecran E	84
3.4.4.	Ecran horizontal (H)	86
3.4.5.	Enceinte à vide (V).....	87
3.4.6.	Couvercle de l'enceinte à vide (C)	90
3.4.7.	Couvercle du Styrodur® (P).....	91
3.4.8.	Surface du film isolant à faible émissivité.....	91
3.5.	Ordre de grandeur des résistances thermiques de conduction	91
3.6.	Synthèse du modèle.....	92
4.	Conclusion.....	93
5.	Références	94
Chapitre IV Dimensionnement et faisabilité		97
1.	Introduction.....	99
2.	Analyse de résultats du modèle	99
2.1.	Influence de la température du milieu extérieur au calorimètre.....	99
2.2.	Cartographie thermique du calorimètre	101
2.3.	Influence de l'écran H.....	102
2.4.	Influence du matériau de l'amenée de courant sur le rayonnement du composant à l'intérieure de la cellule de mesure	104
2.5.	Influence de l'émissivité	105
2.5.1.	Surface interne de la cellule	105
2.5.2.	Surface de l'éprouvette testée (composant).....	106
2.6.	Fuites thermiques de la cellule de mesure	108
2.7.	Détail des fuites thermiques	109
2.7.1.	Supports et amenées de courant	110
2.7.2.	Profil de la température dans l'amenée de courant.....	111
2.8.	Sensibilité et performances prévues par la modélisation	114
3.	Dynamique thermique du calorimètre.....	115
4.	Conclusion.....	118
5.	References	120
Chapitre V Essais et validation		121
6.	Introduction.....	123
7.	Précision des températures mesurées	123
7.1.	Comportement en régime permanent.....	123
7.2.	Comportement en régime transitoire	124
8.	Réponse thermique de la cellule de mesure	125
8.1.	Réponse thermique sans régulation.....	125
8.2.	Réponse thermique en présence de la régulation	128
8.2.1.	Etude de la réponse thermique sans composant actif.....	128
8.2.2.	Etude de la réponse thermique avec composant actif.....	131
9.	Etude des gradients thermiques	132
9.1.	Etude des gradients thermiques dans l'épaisseur de la cellule	132
9.1.1.	Influence des fils chauffants	132
9.1.2.	Influence de la nature du support d'accrochage de la cellule.....	138
9.2.	Etude des gradients thermiques sur l'écran vertical et sur l'enceinte	142
9.3.	Synthèse des gradients thermiques	142
10.	Etendue de mesure de la puissance dissipée par un composant.....	143
11.	Validation du dispositif sur un composant purement résistif	149
11.1.	Caractéristiques du composant de référence	149

11.2.	Caractéristiques de l'alimentation du composant de référence.....	150
11.3.	Résultats et analyse	150
11.3.1.	Incertitude théorique sur la mesure de puissance dissipée	150
11.3.2.	Précision obtenue expérimentalement	151
11.3.3.	Influence de la température sur la puissance mesurée	155
11.3.4.	Influence de la nature du support d'accrochage de la cellule	157
11.3.5.	Influence de l'émissivité du composant sur la puissance mesurée	162
12.	Etude comparative des pertes dans un condensateur	164
13.	Conclusion	164
14.	Références	167
	Conclusion.....	169
	Annexe : modes opératoires du calorimètre	175
1.	Introduction.....	177
2.	Casser le vide du calorimètre	177
3.	Ouverture du calorimètre.....	177
4.	Ouverture de la cellule de mesure.....	177
5.	Installation du composant.....	178
6.	Démarrage du groupe de pompage.....	178
7.	Mesure des pertes de puissance sur un composant	179
	Table des figures	181

Introduction

Les composants de puissance couvrent un large spectre d'application dans les secteurs de l'automobile, du ferroviaire, de l'aéronautique, de la santé et de la conversion de l'énergie [Milleret2009]. Dans le cadre de leurs applications, les composants de puissance et leur assemblage peuvent subir d'important cyclages thermiques. Ceux-ci sont généralement induits par conduction et commutation. D'autres phénomènes plus spécifiques peuvent être à l'origine de ces pertes : citons par exemple l'hystérésis des matériaux ferromagnétiques, la polarisation diélectrique, et enfin les décharges partielles. Le gradient de température ainsi introduit engendre des contraintes thermomécaniques répétées tout au long de la vie du composant [Smet2008] et affectent ainsi sa durée de vie.

Actuellement, les normes imposent des contraintes sévères de fiabilité et de sécurité de fonctionnement. Il est donc devenu nécessaire de bien connaître le comportement thermique des composants électriques [Lefebvre2009]. On comprend dès lors que la détermination des pertes de puissance dans les composants est d'un enjeu capital. Les récents progrès dans le domaine de l'intégration des composants de puissance, ayant pour effet de densifier les puissances et d'accroître leur charge harmonique, n'ont fait qu'accentuer cet enjeu.

L'estimation des pertes par les méthodes de modélisation numérique est particulièrement attrayante, mais leur essor repose en grande partie sur une confrontation avec des mesures réelles en particulier lorsque les mécanismes de pertes non linéaires existent.

L'évaluation des pertes est rendue difficile lorsque que les rendements deviennent excellents et lorsque les fréquences sont élevées.

Deux types de méthodes de détermination des pertes de puissance dans les composants existent actuellement : les méthodes électriques et les méthodes calorimétriques.

Les méthodes électriques [Xiao2007] permettent de remonter aux pertes du composant en réalisant la moyenne du produit de la tension et du courant, on les qualifie de méthodes indirectes. En régimes continus ou alternatifs basse fréquence, la puissance est couramment mesurée à l'aide d'instruments de mesure classiques issus de l'électronique analogique ou numérique. Cependant, pour les signaux à haute fréquence et les signaux de fortes distorsions comme la modulation de largeur d'impulsion (MLI), les dispositifs classiques (voltmètre, ampèremètre et wattmètre) ne sont plus adaptés en raison de leur bande passante limitée. Toutefois, les méthodes électriques sont facilement mises en œuvre et leur reproductibilité est très satisfaisante. Cependant, ces méthodes de mesures perdent tous leurs avantages en présence de forts di/dt et dv/dt et lorsque le déphasage courant tension est proche de $\pi/2$.

Les méthodes calorimétriques permettent quand à elles de mesurer de manière directe les pertes de puissance. Plusieurs méthodes calorimétriques ont largement été utilisées en électronique de puissance et présentent des précisions remarquables par rapport aux méthodes électriques. Cependant, les mesures sont réalisées généralement en régime stationnaire et induisent par conséquent un temps de mesure plus long.

La plupart des méthodes calorimétriques actuellement utilisées présentent un certain nombre de limites tant sur leur gamme de puissance, de fréquence, de tension ou de température d'utilisation que sur la géométrie du composant de puissance à tester.

Afin de pallier à ces limites, nous avons donc conçu et réalisé un nouveau dispositif calorimétrique à rayonnement thermique permettant de repousser les insuffisances habituellement rencontrées dans les calorimètres actuels. La conception de ce nouveau calorimètre a été effectuée à l'aide d'un modèle analytique des échanges de chaleur entre les différents éléments du dispositif. Ce dispositif a été réalisé avec le support du Service d'Etude et de Réalisation d'Appareillage Scientifique de Grenoble (SERAS®).

Dans ce mémoire de thèse, le premier chapitre (Chapitre I) propose un état de l'art de la calorimétrie et ses différentes applications au génie électrique. Une analyse complète des dispositifs utilisant des méthodes adiabatique, quasi-adiabatique, isotherme et à flux de chaleur pour la détermination des pertes de puissance est effectuée. Cette étude a pour but de mettre en évidence les principaux avantages et inconvénients liés à chaque type de dispositif. Nous verrons en quoi, la méthode isotherme paraît la mieux adaptée à notre projet : mesurer de faibles puissances sur une large gamme de température avec une grande précision et sans contraintes géométriques particulières.

Le deuxième chapitre (Chapitre II) est consacré à la description du nouveau dispositif de mesure : son principe, son architecture, son instrumentation ainsi que son utilisation. Nous y trouverons la majeure partie des secrets de fabrication, la nature des matériaux utilisés et les instruments de mesure mis en œuvre.

Dans le troisième chapitre (Chapitre III), nous décrivons le modèle analytique des échanges de chaleur des sous-systèmes du calorimètre en nous appuyant sur des notions élémentaires de transfert thermique.

Le quatrième chapitre (Chapitre IV) présente les résultats de calculs obtenus à partir du modèle analytique des échanges de chaleur dans le calorimètre. L'influence de la température du milieu extérieur sur la puissance entrant dans le calorimètre est mise en évidence. On y quantifie également le ratio flux rayonné sur flux total généré par le composant en fonction de la température de la cellule pour différents matériaux de l'amenée de courant nécessaire à l'alimentation électrique du composant. L'impact des émissivités du composant à tester et de la cellule de mesure sur le ratio flux rayonné sur flux total dissipé par le composant et les différentes fuites thermiques par conduction sont aussi analysés. La sensibilité théorique du dispositif calorimétrique est illustrée dans l'avant dernière partie de ce chapitre. Des calculs en régime transitoire ont également été réalisés afin de pouvoir apprécier les dynamiques thermiques de chaque constituant du dispositif calorimétrique. Nous verrons en quoi ces résultats ont été utilisés pour valider et optimiser le fonctionnement de ce nouveau calorimètre.

Dans le Chapitre V une caractérisation réelle en régime stationnaire et transitoire des différents éléments, allant de l'instrumentation aux principaux constituants du calorimètre est menée afin de valider les hypothèses du modèle analytique (Chapitre III). Cette analyse est suivie d'un test de validation du dispositif réalisé à partir d'un composant purement résistif, et ce afin de dégager la précision et l'étendue de mesure du dispositif. Les différentes influences de la température d'essai, de la nature du support de la cellule de mesure et de l'émissivité du composant à tester, sur la précision et l'étendue de mesure du calorimètre sont également mises en évidence. Dans la dernière partie, une étude comparative de mesure des pertes de puissance dans un condensateur entre notre dispositif calorimétrique et un impédance-mètre (Programma IDA200®), est présentée.

[Lefebvre2009] S. Lefebvre, F. Miserey, « Composants à semi-conducteur pour l'électronique de puissance », *Tec et Doc, Hermès – Lavoisier*, 1^{er} Edition, 2004.

[Milleret2009] Cédric MILLERET, « Convertisseurs d'électronique de puissance et systèmes numériques en aéronautique : application au radar météo », *Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab – LEG) UMR 5269, Thèse*, 2009.

[Smet2008] V. Smet, « Fiabilité et analyse de défaillances de modules de puissance à IGBT », *JCGE'08 LYON*, Décembre 2008.

[Xiao2007] Chucheng Xiao, Gang Chen, Willem. G. H. Odendaal, "Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems", *in Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol.43 Issue 3 pp657-664, May-June 2007.

Chapitre I Calorimétrie en génie électrique

1. Introduction

Il existe différentes méthodes directes (i.e. calorimétriques) et indirectes (i.e. : électriques) permettant de mesurer les pertes de puissance dans les composants électriques.

Les méthodes électriques présentent des limites aux fréquences élevées (e.g : c'est le cas des signaux dont la largeur d'impulsion est modulée MLI) ou lorsque le courant et la tension sont proches d'être en quadrature (e.g : c'est le cas des composants fortement réactifs tels que les condensateurs de puissance).

Les méthodes calorimétriques sont réputées précises quelle que soit la nature du signal d'alimentation, mais elles nécessitent d'avantage de temps. En effet ces mesures sont généralement réalisées en régime stationnaire [Xiao2007].

Or aujourd'hui, il est d'une grande importance de pouvoir accéder aux pertes de puissance avec précision afin d'apprécier à leur juste valeur la performance et la fiabilité des composants électriques.

Ainsi, nous avons privilégié l'étude des méthodes directes.

Des dispositifs calorimétriques utilisant des principes distincts ont été développés afin de mesurer les pertes dans les composants électriques. Nous présentons ci-après ces différents dispositifs, leurs points forts et points faibles, mais au préalable nous allons rappeler les grands principes calorimétriques.

2. Introduction à la calorimétrie

2.1. Principes généraux

Les principes qui régissent la calorimétrie sont déduits du premier principe de la thermodynamique:

- Principe de l'égalité des échanges de chaleur :

Quand un système A échange de la chaleur avec un autre B, et rien que de la chaleur, la quantité de chaleur ($Q_B > 0$) gagnée par B est égale à la quantité de chaleur ($Q_A < 0$) perdue par A (1).

$$Q_A + Q_B = 0 \quad (1)$$

- Réversibilité des transformations :

La quantité de chaleur qu'il faut fournir à un système pour le faire passer d'un état 1 à un état 2 est égale à celle qu'il restitue lorsqu'il revient de l'état 2 à l'état 1.

La Figure 1 montre le principe de fonctionnement d'un calorimètre. Il s'agit d'une enceinte S isolée du milieu extérieur, dans laquelle deux corps échangent de l'énergie. Le corps à étudier est noté A, le corps B aux propriétés connues, constitue le corps calorimétrique.

L'enceinte S peut éventuellement échanger de l'énergie avec un thermostat Th (la pièce par exemple).

Par application du premier principe, le bilan d'énergie du système lors d'une transformation quasi-statique entre deux états d'équilibre est donné par (2) :

$$\Delta(E_A + E_B) = W + Q \quad (2)$$

où E_A et E_B sont les énergies totales respectives de A et B (i.e. $E = E_p + E_c + U$ avec E_p l'énergie potentielle ; E_c l'énergie cinétique et U l'énergie interne), W représente le travail échangé avec le milieu extérieur et Q la quantité d'énergie échangée sous forme de chaleur.

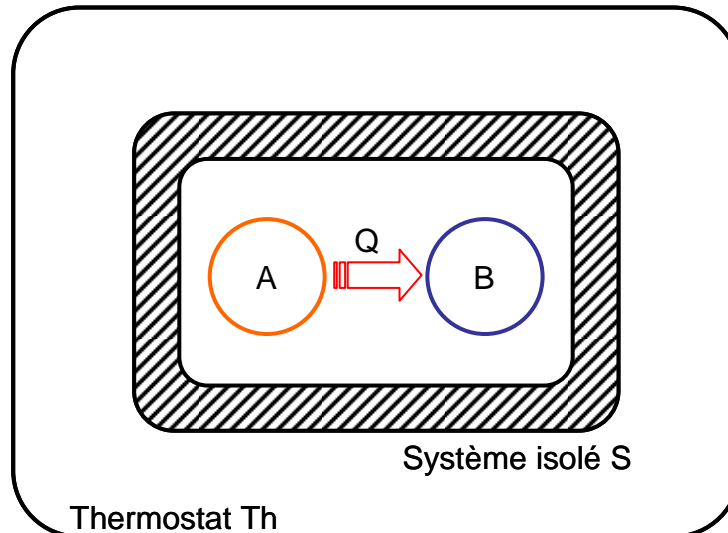


Figure 1 : Principe de la calorimétrie. On mesure l'échange de chaleur Q entre deux corps A et B isolés du monde extérieur Th par S

Dans le cas particulier d'un système thermoélastique fermé (à composition constante), immobile, et soumis à une contrainte externe uniforme de pression, la relation (5) peut se réécrire sous la forme :

$$\Delta(U_A + U_B) = -P_{\text{ext}} \Delta V + W_u + Q \quad (3)$$

où U est l'énergie interne du corps, $-P_{\text{ext}}\Delta V$ est le travail des forces de pression extérieures, W_u représente le travail autre que celui des forces de pression (travail électrique par exemple).

La pression étant supposée uniforme, on peut alors définir une nouvelle grandeur $H=U+PV$, appelée enthalpie. La relation (3) devient (4) :

$$\Delta(H_A + H_B) = W_u + Q \quad (4)$$

Plusieurs méthodes calorimétriques dont nous allons rappeler les principes reposent sur la relation (4).

2.2. Méthode adiabatique

2.2.1. Description

La méthode adiabatique est celle pour laquelle il n'y a aucun échange de chaleur avec le milieu extérieur au calorimètre.

Le schéma de principe du calorimètre adiabatique est donné par la Figure 2. Il est constitué d'un système S contenant les corps A et B, et d'une résistance électrique chauffante permettant de fixer la température de S. Le système S est lui-même logé à l'intérieur d'un thermostat Th.

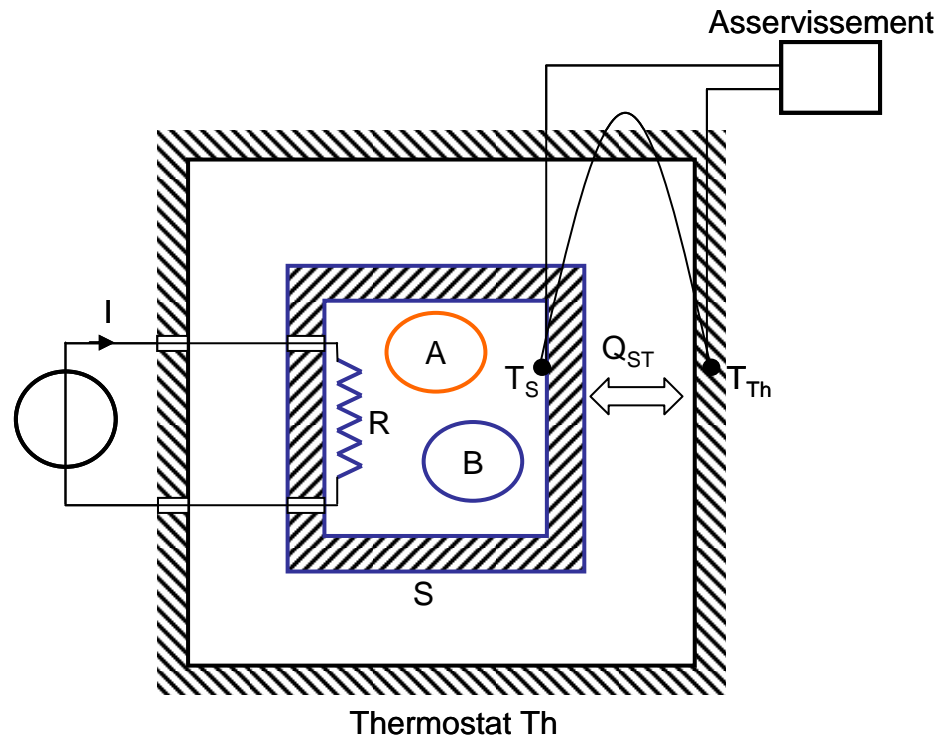


Figure 2 : Principe du calorimètre adiabatique. La température T_{Th} de Th est asservie (maintenue égale) à la température T_S de S afin d'annuler l'échange de chaleur Q_{ST} . La source de chaleur R permet de régler la température initiale du système S. On mesure la variation de température de S au cours du temps. La capacité calorifique de B étant connue, on en déduit la chaleur échangée par A

Un asservissement impose que la température du thermostat Th soit toujours égale à la température du système S, de manière à ce que les échanges de chaleur noté Q_{ST} entre Th et S soient constamment nuls ($Q_{ST} = 0$, d'où adiabatique).

2.2.2. Principe de mesure

La mesure est basée sur la variation de température du système constitué par le corps à étudier A, le corps de référence B et éventuellement son récipient S, en fonction de l'énergie qui lui est fournie par effet Joule [Berge1969] [Rogez1980] [Mainard1970]. L'équation des transferts de chaleur est donnée par (5).

$$Q_A + \int_{T_S(t_1)}^{T_S(t_2)} C_{P,B} dT + \int_{t_1}^{t_2} dt.K \times \Delta T = RI^2(t_2 - t_1) \quad (5)$$

où Q_A représente l'énergie thermique reçu par A dans l'intervalle de temps t_2-t_1 , $C_{P,B}$ est la capacité calorifique de B et éventuellement du récipient S. K et ΔT sont respectivement, le coefficient calorimétrique d'échange et la différence de température entre le système S et le thermostat Th. La différence t_2-t_1 représente la durée de l'expérience.

De (5), on peut déduire la chaleur reçue par l'échantillon A en négligeant la variation de température ΔT entre S et Th (6).

$$Q_A = RI^2(t_2 - t_1) - \int_{T_S(t_1)}^{T_S(t_2)} C_{P,B} dT \quad (6)$$

Les calorimètres basés sur ce principe sont relativement maniables. Cependant, l'asservissement du corps S à la température du thermostat peut entraîner des fluctuations thermiques et donc des inhomogénéités en température. Par ailleurs il est nécessaire de connaître avec précision la capacité calorifique $C_{P,B}$ afin d'étalonner au mieux le dispositif calorimétrique. Chacune de ces contraintes ont un effet sur la précision du calorimètre.

2.3. Méthode quasi-adiabatique ou isopéribolique

2.3.1. Description

Un calorimètre isopéribolique est un calorimètre dans lequel il n'y a pas de couplage (contact thermique) entre le vase calorimétrique et le thermostat. La température du thermostat qui entoure le vase est maintenue constante (isopéribolique). La grandeur mesurée est la température T_B du système (vase calorimétrique) en fonction du temps avec T_e (température de l'huile) supposée fixe (Figure 3),

Le calorimètre de Berthelot et le vase de Dewar sont des exemples de calorimètre isopéribolique.

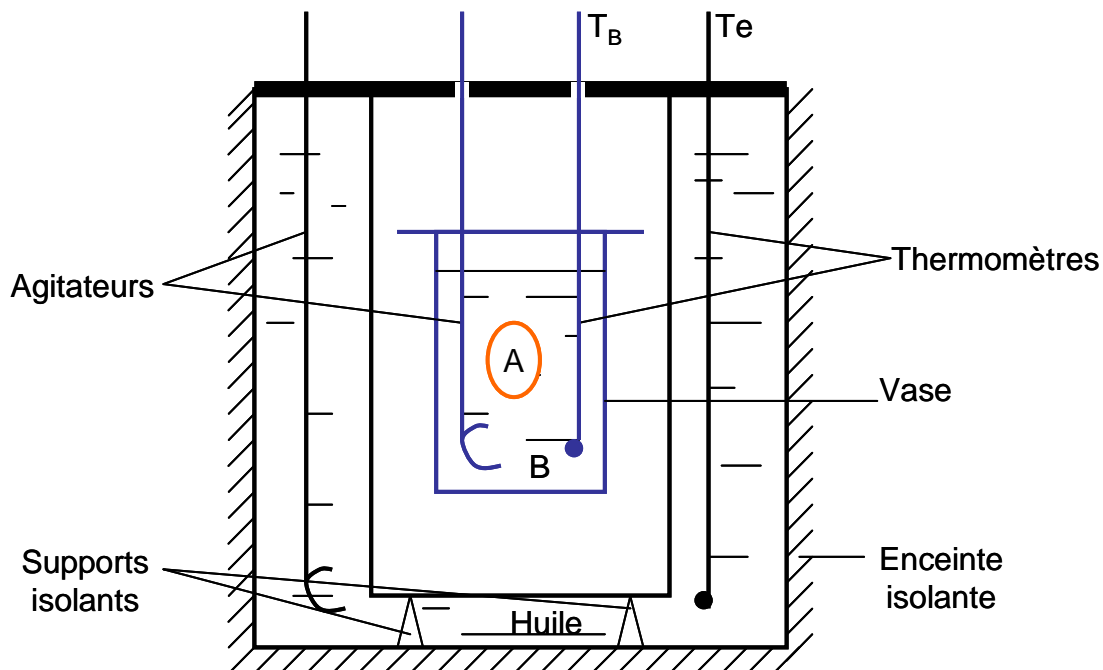


Figure 3 : Principe du calorimètre isopéribolique. La capacité calorifique de B est connue. Le système est quasiment adiabatique car T_e varie peu durant la mesure. On mesure la variation de température T_B . On en déduit la chaleur échangée par A

2.3.2. Principe de mesure

Soient, un échantillon à tester A de masse m_A et le corps calorimétrique que l'on peut noter B, de masse équivalente μ , constitué du vase calorimétrique et des instruments de mesure et des agitateurs.

Le premier principe de la thermodynamique appliqué à ce calorimètre conduit à l'équation (7) :

$$\Delta(U_A + U_B) = W + Q = Q \quad (7)$$

où Q est considérée comme faible puisqu'il n'y a quasiment pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur, d'où (8).

$$\Delta(H_A + H_B) = 0 \quad (8)$$

avec $\Delta H_B = \mu C_{p,B}(T'_B - T_B)$, et $\Delta H_A = Q_A$, avec Q_A chaleur dissipée par A à pression constante d'où (9).

$$Q_A = -\Delta H_B = -\mu C_{p,B}(T'_B - T_B) \quad (9)$$

Ce type de dispositif permet d'effectuer des mesures de courte durée. Il est d'ailleurs généralement utilisé pour mesurer les échanges de chaleur lors de réactions chimiques rapides et pour des énergies de réaction élevées. Cependant cette méthode impose de déterminer avec précision la masse équivalente du corps calorimétrique, et de limiter l'évaporation des liquides calorimétriques.

2.4. Méthode isotherme

2.4.1. Description

Un calorimètre isotherme est caractérisé par une enceinte dont la température doit rester rigoureusement constante (enceinte interne Figure 4).

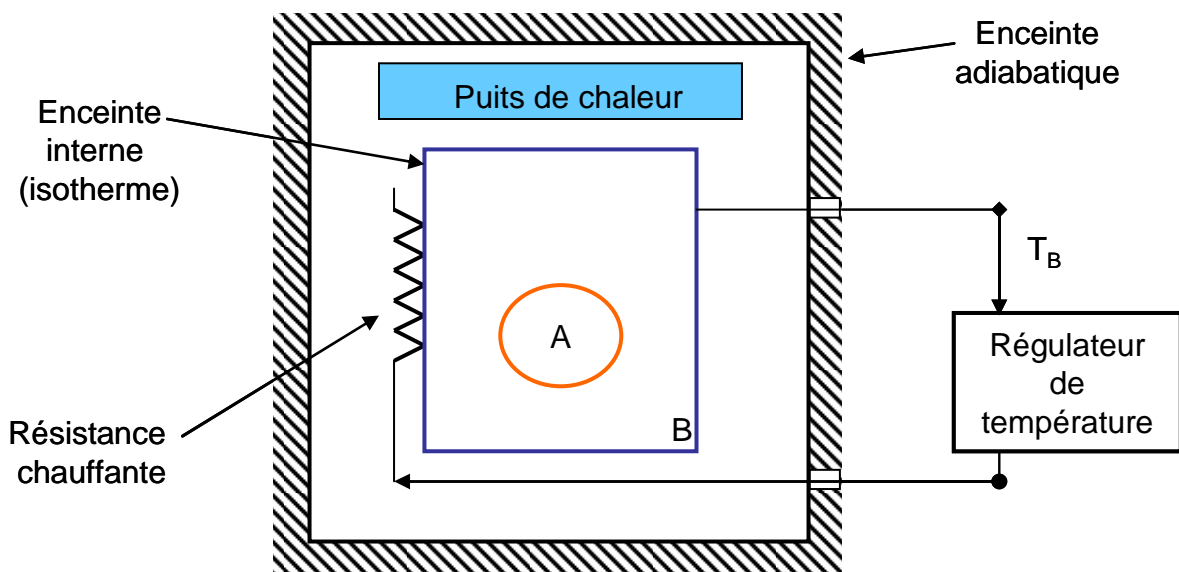


Figure 4 : Principe du calorimètre isotherme. On maintient constante la température de B. On mesure la variation de la chaleur apportée à B par le régulateur. On en déduit la chaleur échangée par A

Le calorimètre de Bunsen à glace est un exemple de calorimètre isotherme [Ditmars1976].

2.4.2. Principe de mesure

Durant la mesure, l'enceinte interne B est fixée à une température T_B par la régulation de température. Ainsi, aucune quantité de chaleur ne doit s'accumuler

dans l'enceinte interne, la mesure effectuée est alors celle d'un flux thermique. Pour ce faire, les dégagements ou absorptions de chaleurs provoqués par le phénomène étudié (composant A) doivent être compensés aussi parfaitement et aussi rapidement que possible par l'apport ou le pompage artificiel de chaleur [Imelik1988].

L'apport de chaleur est généralement produit par effet Joules. La dissipation est réalisée au moyen d'une pompe à chaleur ou encore d'un réservoir cryogénique.

Ce type de dispositif permet des mesures précises de quantités de chaleur émises ou absorbées par un objet, si on prend soin au préalable de bien étalonner l'appareil. Cependant, la durée des mesures peut être assez longue.

2.5. Méthode à flux de chaleur

2.5.1. Description

Le calorimètre à flux de chaleur est constitué d'une enceinte interne (cellule de mesure), située à l'intérieur d'une seconde enceinte appelé bloc calorimétrique (enceinte externe), maintenue à température constante avec une très haute précision [Inaba1984]. Ces deux enceintes sont reliées par un très grand nombre de thermocouples qui entourent la majeure partie de la surface de l'enceinte interne (Figure 5). Ce grand nombre de thermocouples permet de maintenir les deux enceintes en très bon contact thermique [Thibault-Starzyk2004].

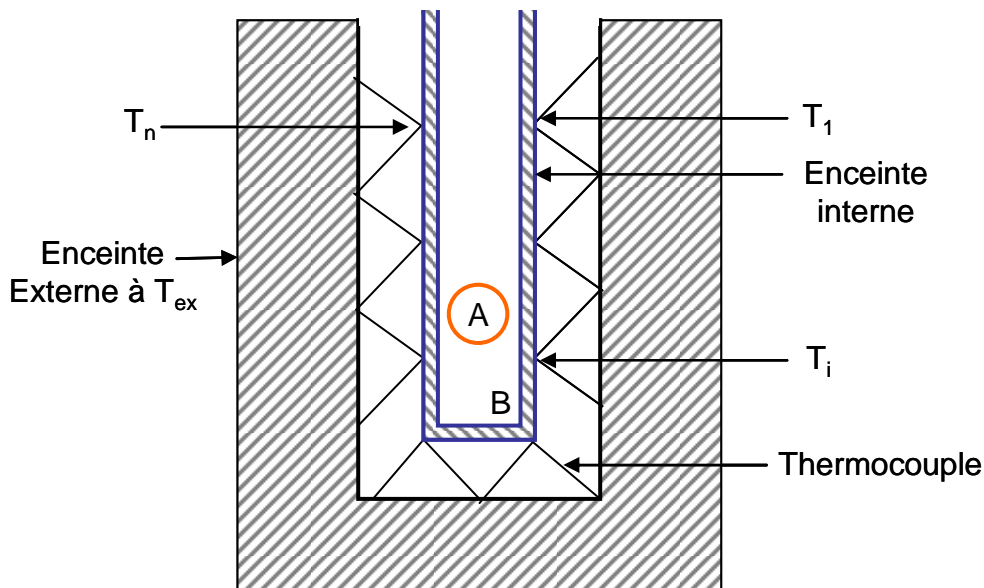


Figure 5 : Principe du calorimètre à flux de chaleur. Chaque paire de thermocouple produit une ddp proportionnelle aux différences de température entre B et l'enceinte externe. On en déduit la chaleur échangée par A qui est proportionnelle à la somme de ces ddp

Quand aucune puissance n'est dissipée dans la cellule interne, les deux enceintes sont à la température fixée par le bloc calorimétrique.

Le faible écart de température généré entre les deux côtés de chaque thermocouple, lorsqu'une éprouvette est active dans la cellule interne, crée une petite différence de potentiel. Cette différence de potentiel est si faible qu'il faut connecter en série les différents thermocouples présents afin d'additionner toutes les

différences de potentiel générées. Cet ensemble de thermocouple est appelé thermopile.

Ce type de calorimètre est appelé à flux de chaleur car le signal calorimétrique n'est pas lié au changement de température mais au flux de chaleur transmis par les thermocouples. A chaque thermocouple i est associée une petite portion de surface du récipient interne, correspondant à l'aire physiquement occupée. Une partie de la surface voisine n'est occupée par aucun thermocouple, mais elle est suffisamment petite pour que l'on puisse considérer qu'elle est isotherme. La température dans cette portion de surface peut être différente de celle de la surface associée à un autre thermocouple j . C'est l'un des avantages de ce type de calorimètre, par rapport à d'autres appareils nécessitant une température homogène.

2.5.2. Principe de mesure du flux de chaleur

Le flux de chaleur transmis par conduction thermique par un thermocouple i (ϕ_i) représente seulement une fraction R de la perte de chaleur totale (Φ_i) associée à cette aire. Ce type de calorimètre est conçu de manière à minimiser les pertes de chaleur par radiation et par convection. La chaleur transmise par le thermocouple peut s'exprimer en fonction de la différence de température entre deux extrêmes, celle du récipient interne (T_i) et celle du bloc calorimétrique (T_{ex}). On a (10) :

$$\phi_i = R\Phi_i = k(T_i - T_{ex}) \quad (10)$$

où k est la conductivité thermique du thermocouple. D'où (11) :

$$\Phi_i = \frac{k}{R}(T_i - T_{ex}) \quad (11)$$

Comme les n thermocouples sont identiques, le flux total est (12) :

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_i = \frac{k}{R} \times \sum_{i=1}^n (T_i - T_{ex}) \quad (12)$$

D'autre part, la différence de potentiel (e_i) générée entre les extrémités d'un thermocouple i est proportionnelle à la différence de température entre les deux enceintes (13) :

$$e_i = \varepsilon_0 \times (T_i - T_{ex}) \quad (13)$$

où ε_0 est le coefficient de Seebeck du thermocouple i

Les thermocouples étant identiques et connectés en série, la différence de potentielle totale générée par la thermopile est donnée par (14) :

$$E = \sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_0 \times (T_i - T_{ex}) \quad (14)$$

Des équations (12), (13) et (14) on en déduit (15) :

$$E = \varepsilon_0 \frac{R}{k} \times \Phi = K \times \Phi \quad (15)$$

L'équation (15) donne la relation entre le flux de chaleur et le signal en sortie du calorimètre, où K est une constante de l'instrumentation.

La méthode à flux de chaleur permet des mesures précises, elle est utilisée par le National Institute of Standards and Technology (NIST) pour la détermination

des capacités calorifiques et des chaleurs latentes de changement de phase des matériaux. Le calorimètre de Tian-Calvet est un exemple de dispositif à flux de chaleur [Inaba1983]. Cependant, la précision de cette méthode dépend de la calibration du dispositif et de la linéarité du coefficient $\varepsilon_0(T)$.

2.6. Comparaison des méthodes

La calorimétrie est fondée sur le premier principe de la thermodynamique. A partir de ce principe, quatre méthodes calorimétriques ont été développées : adiabatiques, quasi-adiabatiques, isothermes et à flux de chaleur. Un résumé de ces différentes méthodes calorimétriques a été présenté. Chacun de ces principes présente des avantages et des limites liés à leur conception.

Ainsi, la méthode adiabatique est relativement maniable. Cependant, l'asservissement utilisé pour rendre le système adiabatique constitue la principale source d'erreur de ce type de dispositif.

Le principe quasi-adiabatique permet d'effectuer des mesures de courte durée. Cependant cette méthode impose de déterminer avec précision la masse équivalente et la capacité calorifique du corps calorimétrique, et de limiter l'évaporation des liquides calorimétriques conduisant ainsi à la réduction de la plage de température d'essai du système.

La calorimétrie isotherme permet des mesures précises de quantités de chaleur émises ou absorbées par un composant si on prend soin au préalable de bien étalonner l'appareil. Cependant, la durée des mesures peut être assez longue et par conséquent, dégrade considérablement la maniabilité de ce type de dispositif.

Enfin, la méthode à flux de chaleur admet des mesures précises. Cependant, la précision de cette méthode dépend de la calibration du dispositif et de la linéarité du coefficient de Seebeck $\varepsilon_0(T)$ de la thermopile utilisée.

3. Calorimétrie appliquée au génie électrique

Plusieurs dispositifs calorimétriques ont été développés dans le but de mesurer les pertes dans les composants de puissance. L'analyse présentée ci-après a notamment pour but de mettre en évidence les limites et les avantages de ces différents dispositifs.

3.1. Calorimètres adiabatiques de Ritchie, Szabados et al.

3.1.1. Description

Plusieurs dispositifs calorimétriques comprenant un échangeur de chaleur ont été conçus pour déterminer des pertes de puissance dans les moteurs électriques [Ritchie2004], [Szabados2002].

A titre d'exemple, la Figure 6 montre le schéma de principe du calorimètre d'Ewen Ritchie et al [Ritchie2004] qui a permis des mesures de pertes de puissance dans la plage de 1 à 50W. Le système de mesure est constitué de deux enceintes concentriques. L'enceinte intérieure représente la cellule de mesure. Dans cette dernière sont placés le composant à tester, un échangeur thermique et une résistance chauffante. Cette dernière sert à fixer la température de l'essai et constitue le composant étalon du calorimètre.

Pour isoler le système, l'enceinte interne est recouverte d'un matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre. La température de la surface interne de cette enceinte est contrôlée par deux rangées de 24 sondes Pt100. Un ensemble de 68 lampes constitue la source de chaleur externe à l'enceinte intérieure. La puissance radiative émise par les lampes permet de rendre cette enceinte adiabatique.

Le circuit de refroidissement comporte un système de réfrigération, un échangeur thermique placé dans l'enceinte intérieure et une résistance chauffante placée en amont de l'enceinte intérieure. Cet élément chauffant permet de fixer la température d'admission du réfrigérant T_{ad} . Les températures d'admission (T_{ad}) et de refoulement (T_{ref}) du fluide sont mesurées par des sondes Pt100.

Le réfrigérant est ici de l'eau dont les caractéristiques thermiques sont bien connues. Une pompe à engrenage permet de contrôler le débit du réfrigérant de manière à obtenir un régime d'échange thermique stationnaire.

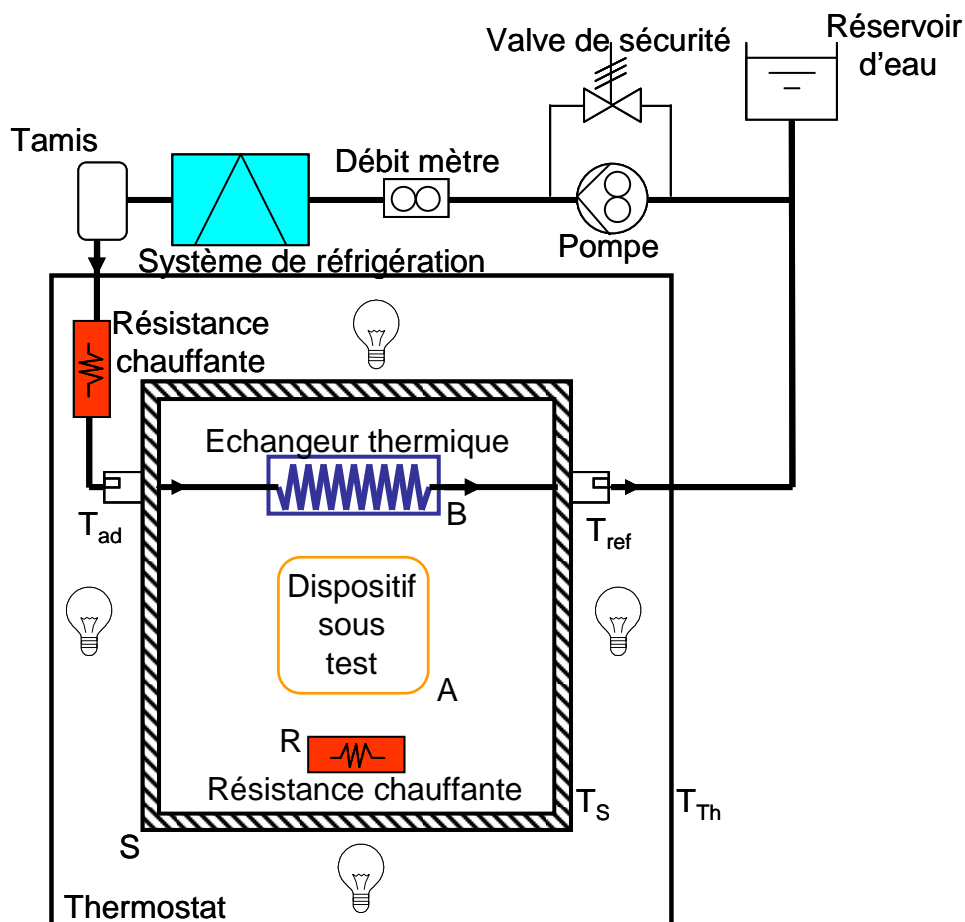


Figure 6 : Calorimètre adiabatique d'Ewen Ritchie et al. appliqué aux machines électriques. La température T_{Th} de Th est asservie (maintenue égale) à la température T_s de S à l'aide de lampes afin d'annuler l'échange de chaleur. La résistance R permet de régler la température initiale du système S. On mesure l'élévation de la température du fluide passant par l'échangeur thermique. La capacité calorifique du fluide B étant connue, on en déduit la chaleur échangée par A

3.1.2. Principe de mesure

La puissance dissipée P sous forme de chaleur par le composant est calculée à partir de l'équation (16) :

$$P = D_M c_p \Delta T + kA \times \Delta T_f \quad (16)$$

où c_p représente la chaleur massique de l'eau, D_M son débit massique, ΔT l'écart de température entre la température d'admission et la température de refoulement du fluide, k la conductivité thermique de l'enceinte interne, A sa surface et ΔT_f l'écart de température entre la surface interne et la surface externe de l'enceinte interne. La variation ΔT_f est considérée comme négligeable puisque le système est supposé adiabatique.

Le calcul de la puissance passe donc par la mesure du débit D_M et de l'écart de température ΔT .

3.1.3. Points forts et points faibles

Le point fort du système de mesure calorimétrique d'Ewen Ritchie est qu'il permet des mesures de puissance allant du Watt à plusieurs dizaines de Watt.

Pour une génération de puissance du composant comprise entre 1 et 10 W l'erreur sur la mesure est évaluée à 59 mW pour une température de mesure fixée à 30 °C. Dans la gamme allant de 10 à 50 W, cette erreur atteint une valeur de 180 mW à 30 °C également. Les mesures à 30 °C nécessitent un offset de 60 mW, ainsi la précision des mesures est de ± 30 mW à 30 °C. Les résultats à 45 °C nécessitent un offset de 315 mW et à 70 °C, un offset de 749 mW.

L'évolution de l'offset avec la température semble montrer une altération de la mesure lorsque la température augmente, ce qui peut fortement dégrader la précision de mesure à faible puissance.

Le problème majeur de ce type de dispositif réside dans la complexité du circuit hydraulique, il est à la fois coûteux et nécessite des équipements très spéciaux. Aussi, la gamme de température du dispositif est limitée, elle ne dépasse pas 80 °C et les mesures à basse température (en dessous de 0 °C) ne sont pas possible avec cet appareil.

Dans des applications à faible perte de puissance (≤ 100 mW), ce système semble inutilisable en l'état.

3.2. Calorimètre quasi-adiabatique de Cyril Buttay et al.

3.2.1. Description

Un dispositif calorimétrique a été conçu à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon pour caractériser les pertes de puissance dans les convertisseurs de l'électronique de puissance [Buttay2004].

L'appareil expérimental est représenté à la Figure 7. Le composant à tester est placé dans un bain d'huile, qui assure la dissipation de la chaleur. Un système de brassage, non représenté, permet d'homogénéiser la température T_B du bain d'huile B.

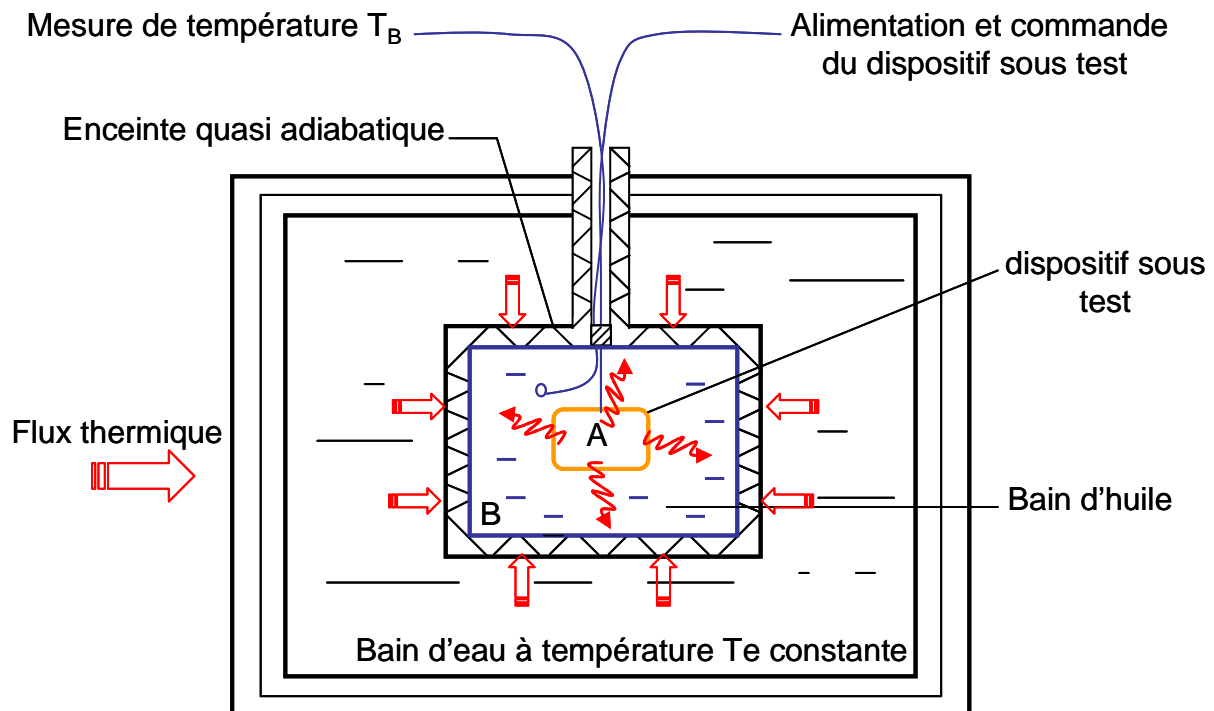


Figure 7 : Calorimètre quasi-adiabatique de Cyril Buttay et al. appliqué aux convertisseurs statiques. La capacité calorifique de l'huile B est connue. Le système est quasiment adiabatique car la température du bain d'eau T_e varie peu durant la mesure. On mesure la variation de température T_B . On en déduit la chaleur échangée par A

Le bain d'huile ne pouvant être placé dans des conditions parfaitement adiabatiques, notamment à cause des amenées de courants, l'enceinte le contenant est elle-même plongée dans un bain d'eau à température T_e constante. Ainsi, on assure des conditions de fonctionnement quasi-adiabatique de telle sorte que le flux de chaleur passant de l'eau vers l'huile reste pratiquement constant durant la mesure.

3.2.2. Principe de mesure

Le bain d'huile est considéré comme étant parfaitement homogène en température. On néglige, en première approche, son élévation de température (de l'ordre de 0.5°C) due à la génération de pertes du composant lorsqu'il est en fonctionnement, devant l'écart de température eau-huile (typiquement de l'ordre de plusieurs degrés Celsius). La puissance totale transitant entre l'eau et l'huile est considérée dans ce cas comme étant constante.

L'énergie thermique E dissipée par le composant en fonctionnement est calculée à partir de la relation (17).

$$E = C_{TH} \Delta T_B \quad (17)$$

où C_{TH} est la capacité thermique totale du contenu de l'enceinte quasi-adiabatique (bain d'huile, composant, les instruments de mesure et de brassage). ΔT_B est l'élévation de température de ce contenu.

Pour calculer la puissance dissipée sous forme de chaleur par le composant, il suffit alors de connaître précisément la durée pendant laquelle le système a fonctionné.

3.2.3. Points forts et points faibles

Ce dispositif calorimétrique présente une bonne précision des mesures (0.7%) dans le cas des convertisseurs testés.

Cependant, pour des composants ayant de fortes pertes de puissance, l'élévation de température du bain d'huile ne peut plus être négligée. Ainsi, les mesures peuvent être affectées par la modification du flux thermique échangé entre l'eau et l'huile.

Ce dispositif ne permet pas non plus d'effectuer des mesures en fonction d'une température ambiante contrôlée. Les composants testés ne peuvent donc pas être caractérisés dans les conditions réelles de température de fonctionnement.

Une évaporation des liquides calorimétriques peut dégrader la mesure puisque la chaleur de changement d'état de ces liquides n'est pas prise en compte par ce principe de mesure.

Enfin, pour les composants ne pouvant fonctionner dans de l'huile, le dispositif calorimétrique présenté ici est inadapté.

3.3. Calorimètre isotherme de Seguin et al.

3.3.1. Description

Un dispositif calorimétrique (schématisé sur la Figure 8) a été conçu et réalisé dans notre laboratoire afin de caractériser les pertes dans les condensateurs de puissance [Seguin1997].

Ce dispositif est composé d'un réservoir d'azote liquide placé dans une enceinte à vide, d'un écran radiatif dont le couvercle est relié au réservoir par l'intermédiaire d'une résistance thermique R_{TH1} , et d'une cellule de mesure. Cette dernière est un collier en cuivre serré autour du composant à tester. L'ensemble (cellule + composant) est situé à l'intérieur de l'écran thermique, il est relié au couvercle par l'intermédiaire d'une résistance thermique R_{TH2} . Les éléments chauffants de 75Ω et de 25Ω sont respectivement fixés sur le couvercle de l'écran thermique et sur la cellule de mesure.

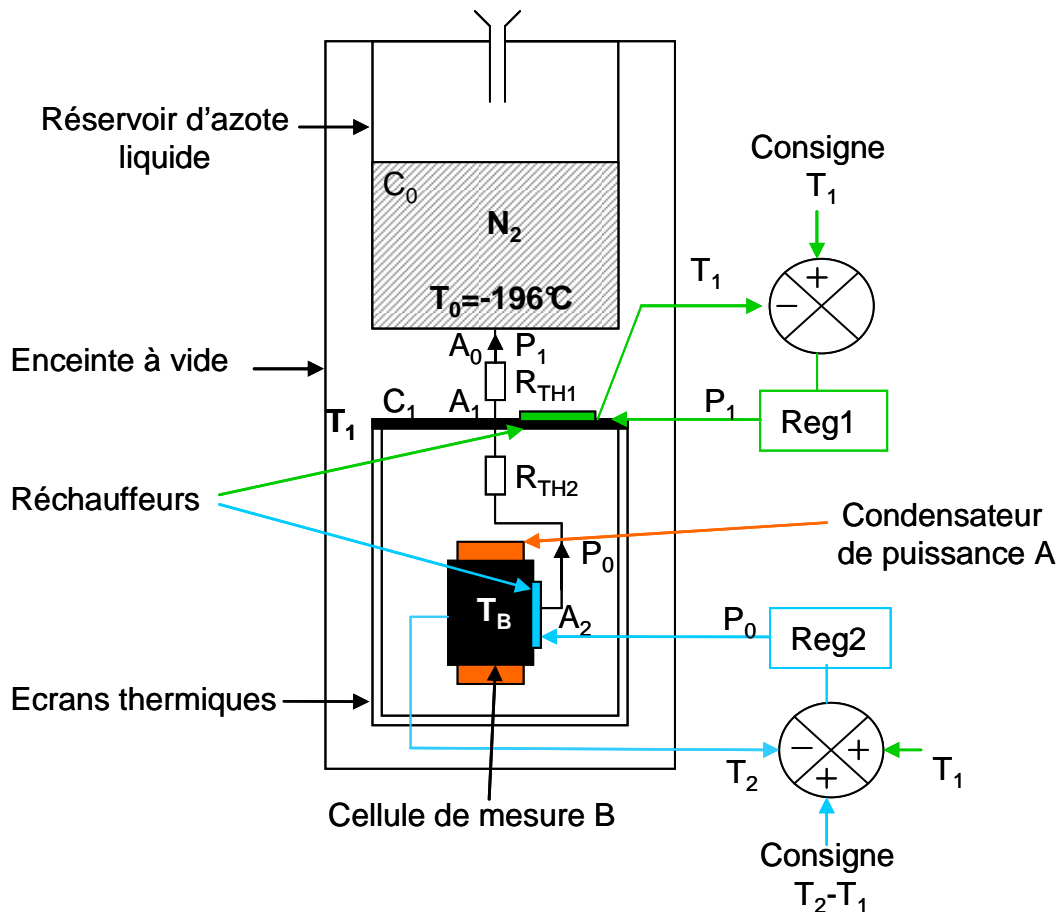


Figure 8 : Calorimètre isotherme de Seguin et al. appliqué aux condensateurs de puissance. On impose une fuite de chaleur constante de B vers le réservoir d'azote C_0 en maintenant $T_B - T_1$ constant à l'aide des régulateurs Reg1 et Reg2. La chaleur échangée par le condensateur A est égale à la variation de puissance fournie par le régulateur Reg2 pour maintenir T_B constante

3.3.2. Principe de mesure

Le principe de mesure du calorimètre est décrit sur la Figure 8. Le système comporte trois niveaux fixés de température :

- le réservoir d'azote liquide C_0 maintient à la température de référence constante T_0 ($T_0 = -196^\circ\text{C}$) le point A_0 de fixation de R_{TH1} au réservoir.
- le point A_1 de fixation de R_{TH1} au couvercle C_1 , est maintenu à la température T_1 par une première régulation de température (Régulation1).
- la température du point A_2 , de fixation de la résistance R_{TH2} à la cellule de mesure B, est T_B . L'écart ΔT ($\Delta T = T_B - T_1$) est stabilisé par une deuxième régulation de température (Régulation2).

Les deux consignes T_1 et ΔT étant fixées, la mesure est réalisée en deux temps :

- tout d'abord, le composant est mis hors tension (Phase 1) et lorsque le régime thermique stationnaire est atteint, on mesure la puissance thermique P_0 à travers la résistance thermique R_{TH2} (18).

$$P_0 = \frac{\Delta T}{R_{TH2}} \quad (18)$$

- Ensuite, lorsque le composant est mis sous tension (Phase 2), il s'échauffe. Cet échauffement entraîne une augmentation de la température de la cellule B. Lorsque le régime thermique stationnaire est de nouveau atteint, la puissance thermique délivrée par la Régulation2 (Reg2) est plus faible qu'auparavant et n'est plus qu'à une valeur notée P. L'écart ΔT étant maintenu constant par la Régulation2, le bilan de puissance à travers la résistance R_{TH2} est donné par (19).

$$P + P_C = \frac{\Delta T}{R_{TH2}} \quad (19)$$

où P_C représente la puissance thermique dissipée par le composant en fonctionnement. Dans ces conditions idéales de fonctionnement, on a (20) :

$$P_C = P_0 - P \quad (20)$$

3.3.3. Points forts et points faibles

Le dispositif calorimétrique décrit précédemment présente une large gamme de mesure en température.

Cependant, il est limité à une géométrie particulière et nécessite donc d'adapter la cellule à la forme du composant.

Une modélisation complète des transferts de chaleur de ce dispositif calorimétrique a été menée par Obame et al. [Obame2008]. La modélisation a permis de mettre en évidence l'existence de gradients de température non négligeables au sein même du calorimètre. Ces gradients traduisent une dissipation de puissance sous forme de rayonnement qui échappe à R_{TH2} . Par conséquent, la puissance caractéristique mesurée par le dispositif ne peut représenter qu'une partie de la puissance réellement dissipée par le composant électrique. Cette description est en accord avec les mesures expérimentales que nous avons réalisées sur un condensateur et sur un composant étalon où l'on observe la dégradation de la mesure lorsque la température T_1 du couvercle augmente. Ce dispositif ne rend donc pas compte des pertes réellement dissipées par les composants testés.

3.4. Calorimètre à flux de chaleur de Chen, Sridhar et al.

Un calorimètre à flux de chaleur (Figure 9) a été développé par Gang Chen et al. [Chen2002]. Il permet de mesurer les pertes de puissance dans les composants de type Integrated Power Electronics Module (IPEM). Ce calorimètre est la version améliorée du dispositif calorimétrique de Shri Sridhar [Sridhar1999].

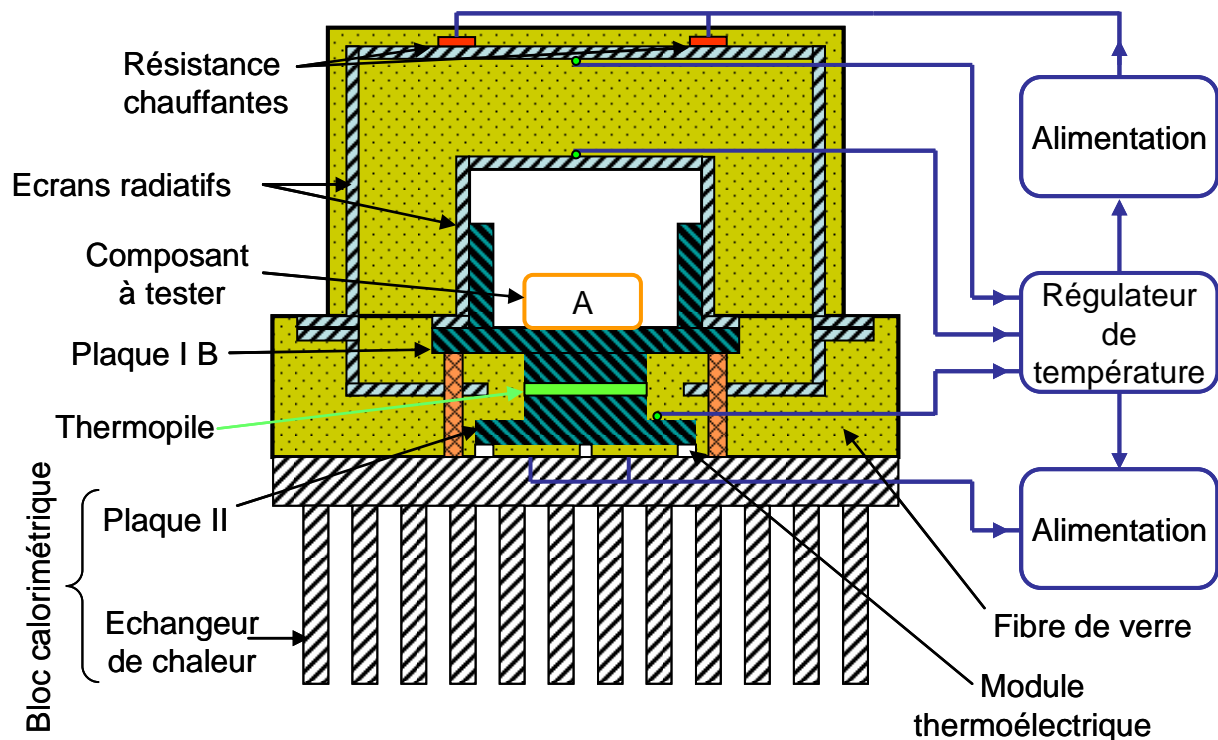


Figure 9 : Calorimètre à flux de chaleur de Chen et al. appliqué aux composants de puissance. La thermopile enregistre une ddp proportionnel aux différences de températures entre B et le bloc calorimétrique. On en déduit la chaleur échangée par A qui est proportionnelle à cette ddp

Le composant est placé sur une plaque d'aluminium (plaque I) en dessous de laquelle est montée une thermopile de 51mm×51mm de surface et 0,2 mm d'épaisseur. La deuxième plaque d'aluminium (plaque II) servant de support à la thermopile, réalise un bon contact thermique avec les Modules Thermo-Electriques (MTE) placés au fond de l'enceinte. Cette plaque favorise la diffusion de la chaleur provenant du composant vers un dissipateur de chaleur, lui-même en bon contact thermique avec les MTE.

Pour limiter les fuites thermiques, l'enceinte calorimétrique est munie de deux écrans polis en aluminium. Un isolant en fibre de verre est utilisé pour combler l'espace vide entre les deux écrans. Ce matériau est également utilisé pour recouvrir le calorimètre. Aussi des éléments chauffants sont montés sur l'écran extérieur pour limiter l'écart de température entre les deux écrans afin de rendre le système adiabatique.

3.4.1. Principe de mesure

Le principe de mesure du calorimètre de Gang Chen et al [Chen2002] est celui d'un calorimètre à flux de chaleur dont la description a été donnée au §2.5. Les MTE permettent de maintenir la plaque II à une température constante. A l'état thermique stationnaire, la chaleur générée par l'IPEM est ainsi proportionnelle à la ddp créée par la thermopile.

3.4.2. Points forts et points faibles

Le dispositif de Gang Chen et al. [Chen2002] est facile à manipuler et permet des mesures rapides de pertes dans des composants testés. Cependant, il ne permet pas des mesures en fonction de la température et comprend deux principales

sources de fuites thermiques : la première source est due à l'imperfection du système d'isolation, et la seconde est due aux amenées de courant.

Pour une puissance thermique de 50 W générée par le composant, les fuites à travers l'isolation sont évaluées à 190 mW lorsque la température du composant est de 36 °C, la température ambiante étant fixée à 25 °C. Ces fuites thermiques restent néanmoins très faibles.

Quant aux amenées de courant, les fuites thermiques causées par une amenée de courant de 200 mm de long, 1,09mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur d'isolation du fil, sont évaluées à 180 mW. Ce calcul est effectué pour une température du composant fixée à 55 °C et une température ambiante fixée à 25°C. Sachant que les fuites dans les amenées de courant évoluent avec la température du composant, la précision des mesures est donc susceptible de s'altérer lorsque la température du composant augmente. De plus, la température d'un composant thermiquement résistif ou réalisant un mauvais contact thermique avec la plaque I, aura tendance à s'élever pour une même puissance générée. Cette élévation de température aura tendance à favoriser les fuites dans les amenées de courant et à causer un fort gradient thermique en leur sein.

Les fuites thermiques dans les amenées de courant et dans les thermocouples n'étant pas prises en compte par le principe de mesure, elles constituent la principale limite de ce calorimètre. Les mesures de faibles pertes ne semblent donc pas possibles avec ce type de dispositif. Aussi, la gamme de température de ce calorimètre est limitée à la capacité des MTE et son principe de mesure reste favorable aux composants réalisant un bon contact thermique avec la plaque I.

3.5. Résumé des caractéristiques métrologiques

Les différents principes calorimétriques connus aujourd'hui ont été appliqués en génie électrique. Ces méthodes calorimétriques restent intéressantes puisqu'elles présentent des précisions acceptables dans certaines plages de mesure. Une analyse de chacun de ces calorimètres a été menée, cette analyse a permis de mettre en évidence les limites associées à chaque type de dispositif. Le Tableau 1 donne un résumé des principales caractéristiques des calorimètres mentionnés.

	Gamme températures	Gamme Fréquences	Gamme Puissances	Précision
Calorimètre. adiabatique [Ritchie2004]	Température ambiante à 80°C	ND (Non Documenté)	1W à 50W	±59mW entre (1 à 10W), ±180mW entre (10 à 50W), à 30°C
Calorimètre. Isopéribolique [Buttay2004]	Ambiante	ND	ND	0,7%
Calorimètre. isotherme [Seguin1997]	-50 à +100°C	1kHz à 1MHz	10 mW à 10 W	1,5%
Calorimètre à flux de chaleur [Chen2002]	Ambiante	ND	<50W	>±180 mW au minimum pour un composant à 55°C

Tableau 1 : Résumé des principales caractéristiques des calorimètres actuellement appliqués au génie électrique

4. Conclusion

La calorimétrie constitue une alternative intéressante pour mesurer les pertes de puissance dans les composants électriques. Contrairement aux mesures électriques elle permet de mesurer les pertes quelle que soit la nature du signal électrique d'alimentation. La calorimétrie permet ainsi de réaliser une mesure directe des pertes. Plusieurs méthodes calorimétriques ont été développées : adiabatique, quasi-adiabatique, isotherme et à flux de chaleur. Une analyse de ces différents dispositifs a été effectuée. Cette étude nous a permis de mettre en évidence les principaux avantages et inconvénients liés à chaque type de dispositif. La méthode isotherme nous est apparue adaptée à notre projet : mesurer de faibles puissances sur une large gamme de température avec une grande précision.

5. Références

- [Berge1969]. Pierre Berge, Georges Blanc, “Calorimètre adiabatique”, *Journal de Physique et le Radium, Physique Appliquée*, Tome 21, No.7, pp.129-133, 1969.
- [Buttay2004] Cyril Buttay, “Contribution à la conception par la simulation en électronique de puissance application à l’onduleur basse tension”, *Thèse de l’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, pp.92-97, 2004.
- [Chen2002] G. Chen, C. Xiao, W. G. Odendaal, “An apparatus for loss measurement of integrated power electronics module: design and analysis”, *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, vol.1, pp.222- 226.
- [Ditmars1976] David A. Ditmars, “Measurement of the Average Total Decay Power of Two Plutonium Heat Sources in a Bunsen Ice Calorimeter”, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, vol.27, pp.469 – 490, 1976.
- [Imelik1988] B. Imelik, J. C. Védrine, “Les Techniques physiques d’étude des catalyseurs”, *Institut de la recherche sur la catalyse*, Edition Technip, pp. 107, 1988.
- [Inaba1984] H. Inaba, S. Takahashi, T. Mima, and K. Naito, “A high temperature Tian-Calvet type calorimeter and an analysis baseline fluctuation”, *J. Chem. Thermodynamics*.vol.16, pp.573–582, 1984.
- [Mainard1970] Mainard, J Kleinclauss et H. Fousse, “Calorimètre adiabatique à température variable et à surfaces d’échanges sphériques”, *Revue de Physique Appliquée*, tome 5, pp.823–827, 1970.
- [Magnusson1998] N. Magnusson, S. Hörnfeldt, “Calorimetric apparatus for alternating current loss measurements on high-temperature superconductors” in *Review of Scientific Instruments*, Vol.69, No.9, September 1998..
- [Obame2008] E. Obame, F. Aitken, O. Gallot-Lavallée, “Review and improvement of a method for measuring losses in the dielectric materials by calorimetry”, in *5th International Conference on Broadband Dielectric Spectroscopy and its Applications (BDS)*, Lyon: France, 2008.
- [Ritchie2004] E. Ritchie, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, P Hansen “Calorimetric Measuring Systems”, in: *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol.10, Issue 3, pp 70–78, May-Jun 2004.
- [Rogez1980] J. Rogez et J. Le Coze, “Description et étalonnage d’un calorimètre adiabatique à balayage (800K–1000K) (*)”, *Revue de Physique Appliquée*, vol.15, pp.341–351, 1980.
- [Seguin1997] B. Seguin, J. P. Gosse, “Dispositif de mesure calorimétrique des pertes dans les condensateurs de puissance”, *Journal de Physique III France*, vol.7, pp.321-336, 1997.
- [Sridhar1999] S. Sridhar, R.M. Wolf, W.G. Odendaal, P. Res, NY. Briarcliff Manor, “An accurate experimental apparatus for measuring losses in magnetic components”, *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, vol.3, pp.2129-2133.
- [Szabados2002] B. Szabados, A. Mihalcea, “Design and Implementation of a Calorimetric Measurement Facility for Determining Losses in *Electrical Machines*”, in

Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 51, Issue 5, pp. 902–907, Oct 2002.

[Thibault-Starzyk2004] Frédéric Thibault-Starzyk, “Les matériaux micro et mésoporeux : caractérisation”, *EDP Sciences Editions*, pp.157–160, 2004.

[Wildi2003] T. Wildi, G. Sybille, “Electrotechnique 3e Edition”, *De Boeck Université*, pp.186-195, 2003.

[Xiao2007] Chucheng Xiao, Gang Chen, Willem. G. H. Odendaal, “Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems”, in *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol.43 Issue 3 pp657-664, May-June 2007.

Chapitre II Description technique du nouveau dispositif expérimental

1. Introduction

L'étude menée sur les calorimètres existants a permis de dégager un certain nombre de défauts et de lacunes. Fort de ce bilan nous avons imaginé un nouveau dispositif.

Tout comme ces trois prédécesseurs, ce calorimètre a donc été conçu pour caractériser les pertes de puissance dans les matériaux diélectriques élémentaires et dans les composants intégrés de puissance.

Dans ce nouveau calorimètre, l'échange thermique entre le composant et la cellule de mesure (formant un corps isotherme) s'effectue par rayonnement. Cette technique permet ainsi de remonter aux pertes du composant en fonction d'un environnement isotherme contrôlé et ce sans contraintes géométrique particulière. Les avancées de ce dispositif sont à la fois dans la gamme de température qui est élargie, la précision de mesure qui est accrue, et la gamme de puissances mesurables qui est mieux adaptée aux applications envisagées.

L'objectif de ce chapitre est de décrire ce nouveau dispositif de mesure : son principe, son architecture et son instrumentation. Le lecteur y trouvera également les différents modes opératoires.

2. Principe

Rappelons préalablement que le principe général d'un calorimètre repose sur la réalisation d'un système thermodynamique isolé, c'est-à-dire qui n'échange aucune forme d'énergie avec son milieu extérieur. Cela permet ainsi de quantifier des transferts de chaleur d'un sous-système à un autre, en se basant sur la mesure des températures.

Or, la réalisation d'enceinte parfaitement isolée étant impossible, on procède généralement à une mesure différentielle. Le nouveau calorimètre n'échappera donc pas à cette réalité.

2.1. Méthode de mesure différentielle

Le principe de mesure de notre calorimètre est schématisé sur la Figure 10. L'objet (i.e. le composant) émettant de la chaleur est placé dans un système isotherme. Dans un premier temps le composant est inactif. On mesure alors la puissance P_0 fournit au système isotherme pour le maintenir à une température T_0 . Dans un second temps le composant est actif. On mesure alors la puissance P_1 fournit au système isotherme pour le maintenir à la température initiale T_0 . Ainsi, en absence de toutes perturbations du milieu extérieur au système, la puissance calorifique générée par l'objet en activité peut être déduite suivant l'équation (21).

$$P_{\text{GEN}} = P_0 - P_1 \quad (21)$$

En effet, lorsque le composant est actif, il génère de la puissance sous forme de chaleur. Cette chaleur générée a tendance à élever la température du système isotherme. Or, pour maintenir le système à la température initiale T_0 , la régulation diminue son apport de puissance à la valeur P_1 . L'écart entre la puissance P_0 et P_1 est dans ce cas, directement égal à la puissance générée par l'objet P_{GEN} .

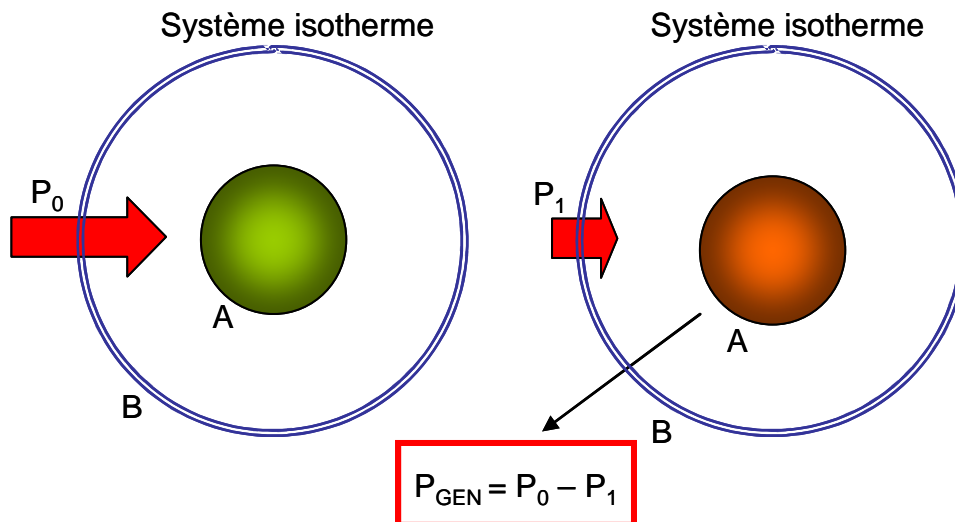


Figure 10 : Principe de la mesure différentielle. L'objet A émettant de la chaleur est placé dans un système isotherme B. Dans un premier temps le composant est inactif. On mesure alors la puissance P_0 fournie au système isotherme pour le maintenir à une température T_0 , Dans un second temps le composant est actif. On mesure alors la puissance P_1 fournie au système isotherme pour le maintenir à la température initiale T_0 . Ainsi, l'écart entre la puissance P_0 et P_1 est directement égal à la puissance générée par l'objet P_{GEN}

2.2. Fonctions élémentaires

Dans ce nouveau calorimètre, l'ensemble corps isotherme-composant, constitue la source de chaleur du dispositif (Figure 11).

L'échange thermique entre le composant et le corps isotherme s'effectue ici par rayonnement. Ce mode de transfert thermique permet en particulier de s'affranchir de la géométrie de l'objet testé.

Le thermostat sert de point froid au système calorimétrique et constitue ainsi le puits de chaleur.

Enfin, pour prévenir d'éventuelles variations de température du milieu extérieur susceptibles de perturber la mesure, la source de chaleur et le thermostat sont situés à l'intérieur d'un système d'isolation thermique.

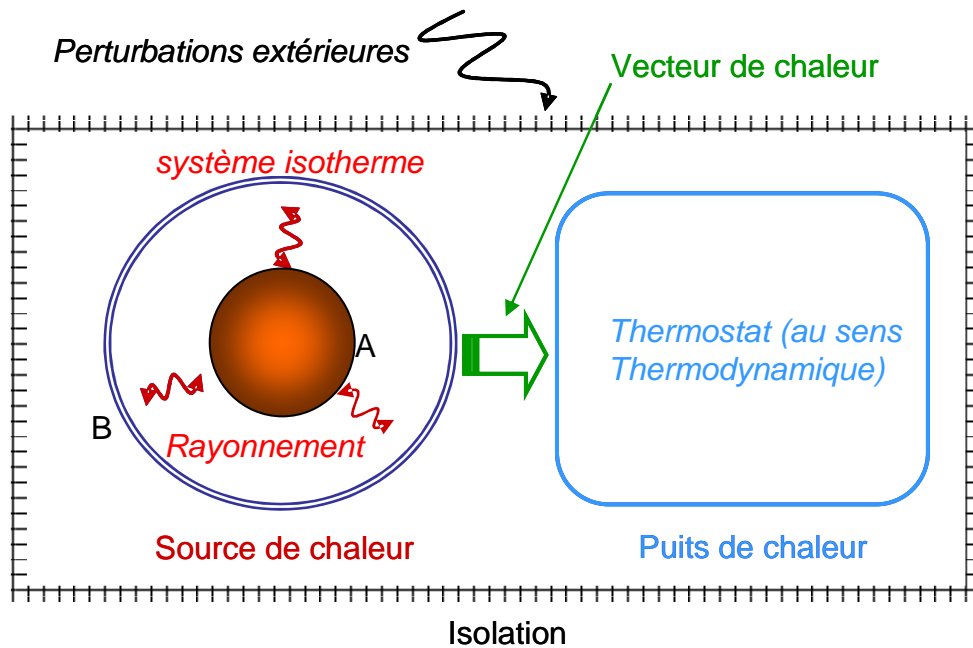


Figure 11 : Modèle fonctionnel. L'ensemble corps isotherme-composant, constitue la source de chaleur du dispositif. L'échange thermique entre le composant et le corps isotherme s'effectue ici par rayonnement. Le thermostat sert de point froid au système calorimétrique et constitue ainsi le puits de chaleur. La source de chaleur et le thermostat sont situés à l'intérieur d'un système d'isolation thermique

2.3. Synthèse

L'isolation parfaite étant techniquement impossible, la méthode de mesure de notre dispositif est basée sur une mesure différentielle. La géométrie des composants pouvant être très variée, nous avons choisi de privilégier un mode d'échange de chaleur par rayonnement entre l'éprouvette testée et le corps isotherme. Les principales fonctions nécessaires à la réalisation de cette mesure sont : une source de chaleur constituée par le corps isotherme et le composant ; une source froide ; un vecteur de chaleur et enfin, une isolation permettant de limiter l'influence des perturbations extérieures. La façon dont sont réalisées ces fonctions est précisée dans le paragraphe suivant.

3. Architecture

Le dispositif que nous avons conçu en collaboration avec le Service d'Etude et de Réalisation d'Appareillages Scientifiques (SERAS) réunit les principales fonctions évoquées précédemment.

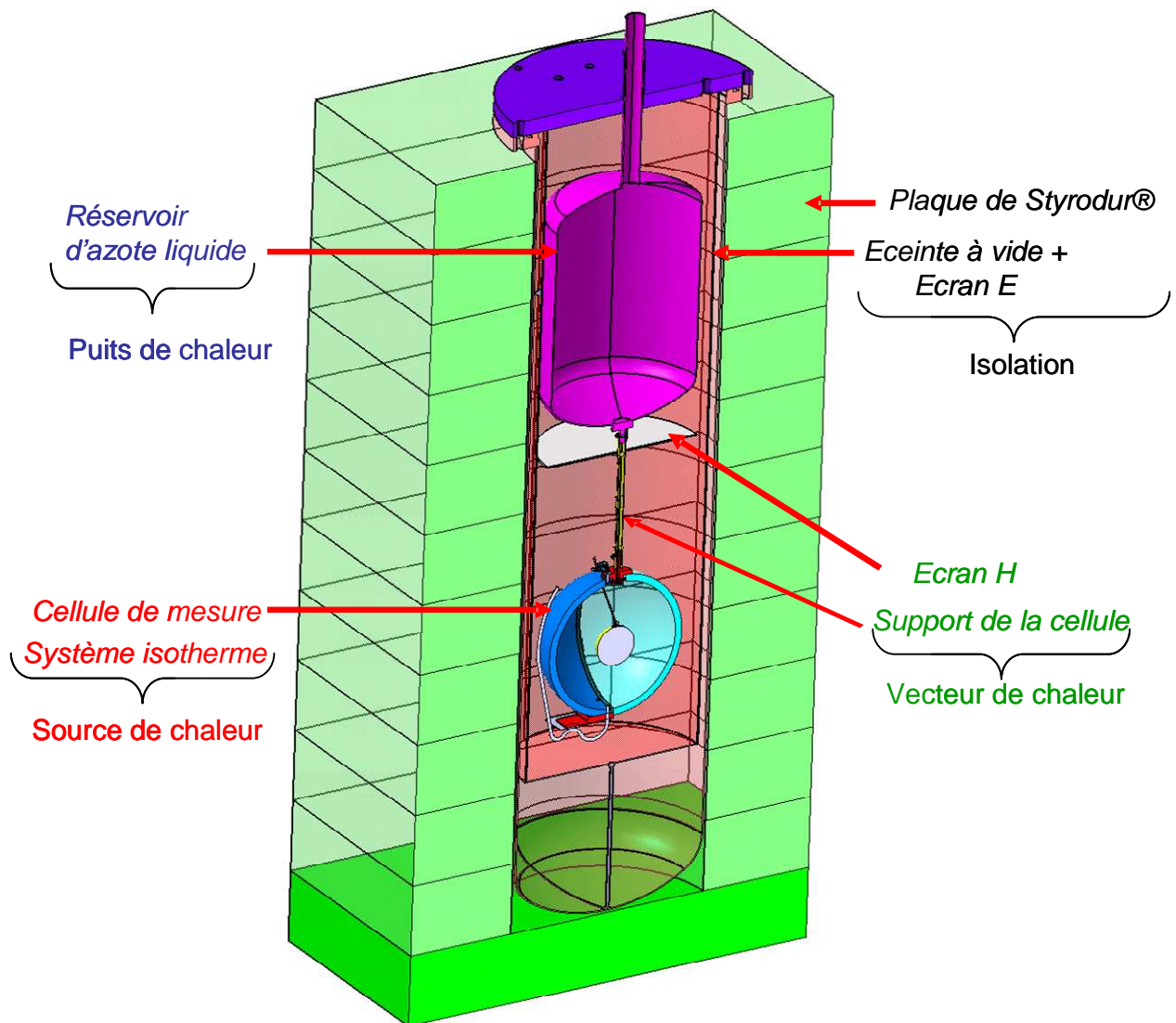


Figure 12 : Coupe longitudinale du dispositif calorimètre dans son ensemble (3D)

Ainsi, il est constitué d'une isolation, d'un corps isotherme au centre duquel est placé un composant, d'un puits de chaleur et d'un vecteur de chaleur (Figure 12).

L'architecture ainsi obtenue est l'aboutissement d'un long travail de modélisation. En effet, l'étude des transferts thermiques (Chapitre III) nous a aidé à définir les caractéristiques géométriques et les propriétés des matériaux employés. Nous avons effectué une construction assistée par la modélisation (CAM). Cette architecture a été aussi influencée par celle d'un ancien dispositif calorimétrique présent dans notre laboratoire [Seguin1997].

3.1. Système d'isolation

Le système d'isolation du calorimètre est constitué de plaques de Styrodur® recouvertes d'une couverture isothermique à faible émissivité, d'une enceinte à vide et d'un écran thermique E. Cette isolation vise à limiter le flux échangé par conduction, par convection et par rayonnement avec le milieu extérieur au calorimètre.

3.1.1. Couverture isothermique à faible émissivité et Styrodur®

La couverture isothermique en polyester métallisé a une faible émissivité (face argentée placée à l'intérieur) ; elle permet de réfléchir 90 % du rayonnement infrarouge provenant du milieu extérieur au calorimètre.

Le Styrodur® se présente sous la forme de panneau en polystyrène extrudé de conductivité thermique $0,034 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 300 K. Ces panneaux ont été forés au centre (Figure 13). Ils recouvrent ainsi la surface extérieure de l'enceinte à vide par empilement des plaques les unes sur les autres (Figure 12). Chaque plaque est collée l'une sur l'autre avec une colle au silicone pour assurer un minimum d'étanchéité.

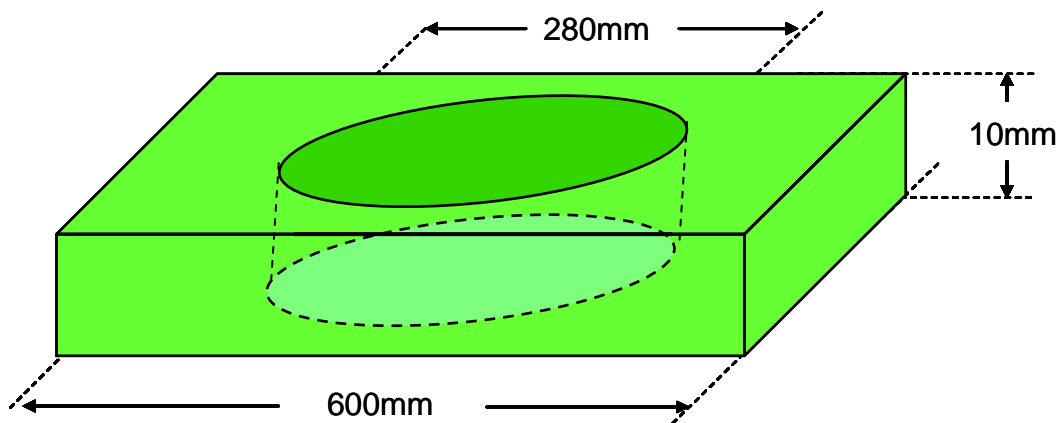


Figure 13 : Panneau de Styrodur® perforé

3.1.2. Enceinte à vide

L'enceinte à vide du calorimètre est un cylindre en acier inoxydable 304L poli à l'intérieur et à l'extérieur (Figure 12). Ce cylindre a une conductivité thermique de $15,3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 300 K [Douglas1979] [Touloukian1976] et une chaleur massique de $477 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [Thermeau2004].

Le principe de fonctionnement du calorimètre consistant à privilégier les échanges de chaleur par rayonnement, il est nécessaire de travailler sous vide pour limiter la convection thermique. Un vide de $5 \cdot 10^{-6}$ mbar est réalisé. Le vide permet également d'améliorer la qualité de l'isolation du système calorimétrique.

3.1.3. Ecran thermique vertical E

L'écran thermique E est un cylindre en cuivre placé à l'intérieur de l'enceinte à vide (Figure 14). Sa conductivité thermique et sa chaleur massique à 300 K sont respectivement d'environ $389 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ et $385 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Centre d'Information du Cuivre, Laitons et Alliages CICLA). Il a été doré et poli sur ses deux faces par la société Mithieux S.A., afin d'abaisser son émissivité.

Une tige composite faite d'époxy et de fibre de verre de 5 mm de diamètre et 40 mm de longueur taillé en pointe sert de support à E. Ce matériau composite a une conductivité thermique et une chaleur massique à 300 K, respectivement de $0,86 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ et $998,7 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [Marquard2000] [Hust1984] [Child1973]. L'extrémité pointue de cette tige s'appuie au fond de l'enceinte à vide et réalise ainsi une résistance thermique importante entre l'enceinte et l'écran E. Pour maintenir l'écran E vertical, et sans contact direct avec l'enceinte à vide, la surface latérale de E est munie vers

son sommet de trois petites tiges de 10 mm de long et 3 mm de diamètre vissées et pointues qui s'appuient sur l'enceinte à vide. Ces petites tiges sont taillées dans le même matériau que la première et sont situées à la même hauteur. L'angle d'une petite tige à l'autre est de 120°.

Comme les autres constituants du système d'isolation, l'écran a pour fonction de limiter le flux thermique entrant dans le calorimètre.

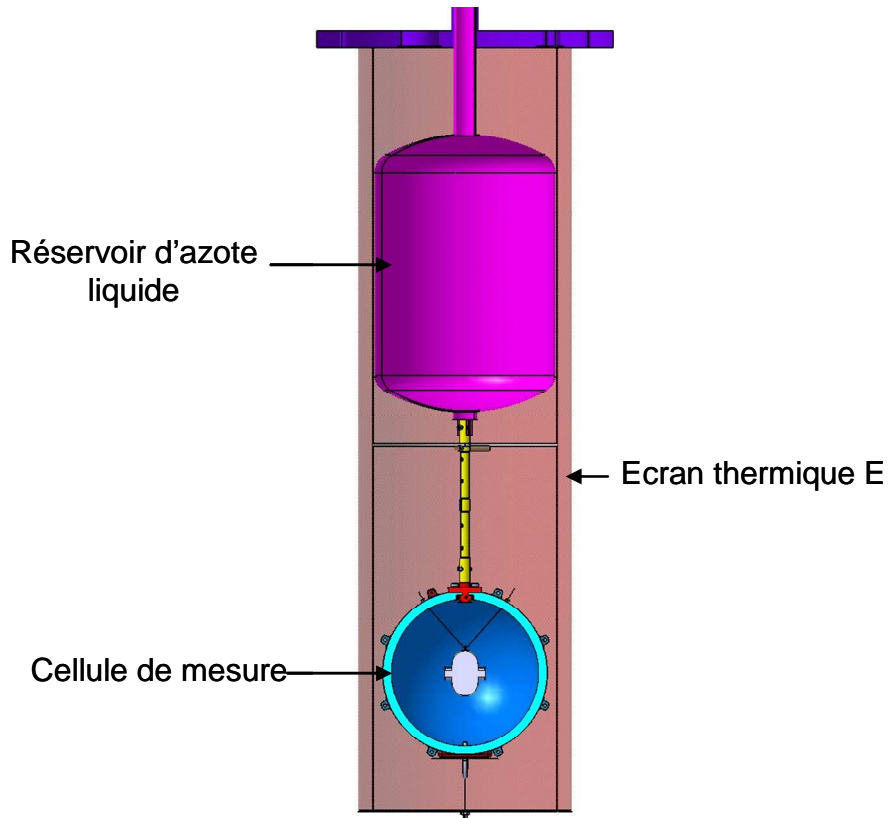


Figure 14 : Vue interne à l'enceinte à vide

3.2. Source de chaleur

La source de chaleur du calorimètre est constituée du corps isotherme (cellule de mesure) et du composant à tester.

3.2.1. Corps isotherme

Le corps isotherme constitue la cellule de mesure (Figure 15). Cette dernière est réalisée sous la forme de deux demi-sphères en cuivre OFHC (Oxygen Free High Conductivity) de conductivité thermique égale à $392,3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [Simon1992] et de chaleur massique égale à $389,4 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [Simon1992] à 300 K. La forme sphérique, l'épaisseur et la nature du matériau ont été choisies de manière à ce que la température de la cellule soit la plus homogène possible. C'est pourquoi la surface d'échange thermique entre les demi-sphères a elle aussi été optimisée. Les deux demi-sphères sont notamment assemblées par un système de huit vis-écrous.

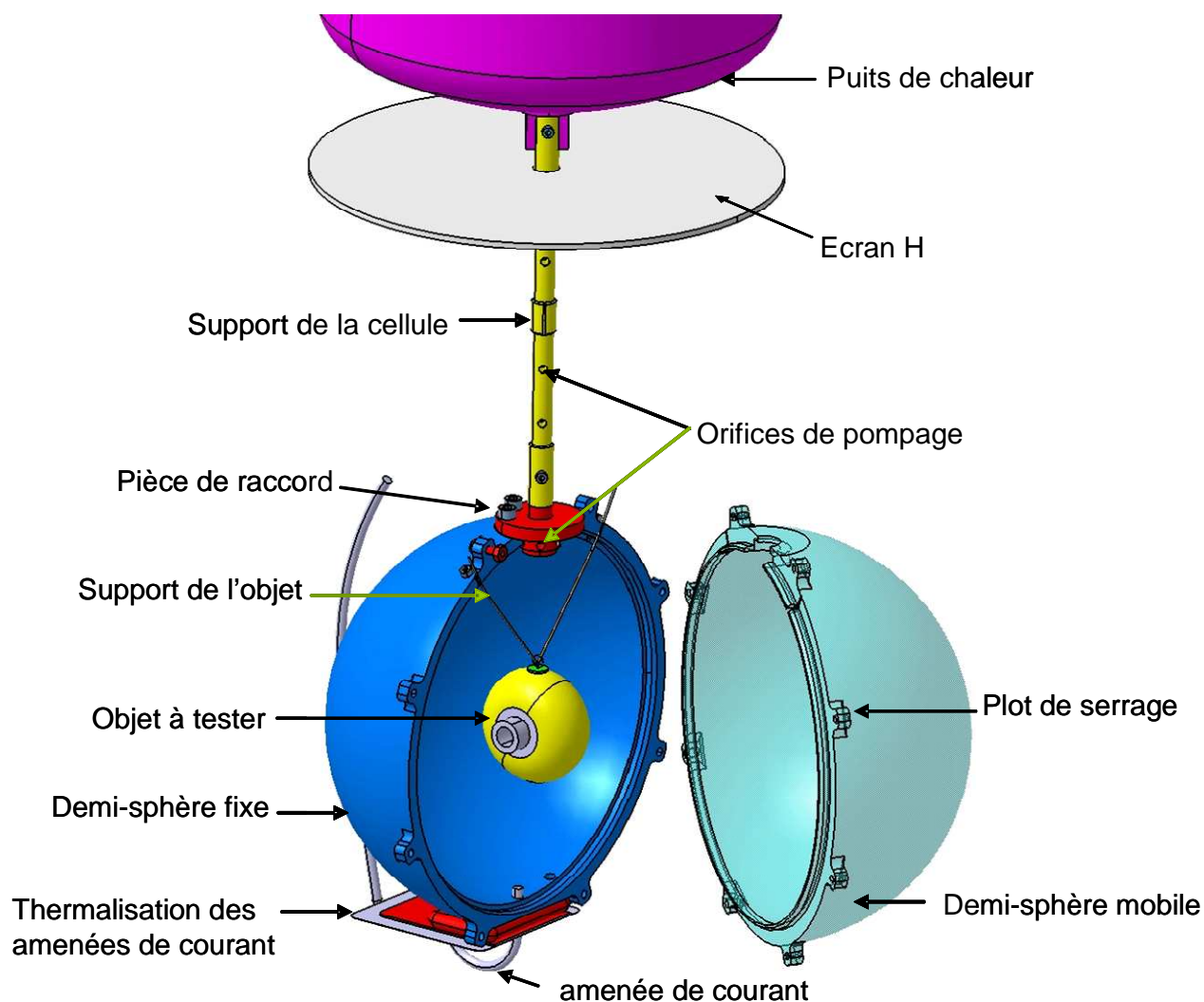


Figure 15 : Vue détaillée de la cellule de mesure et des éléments de raccord au puits de chaleur

Les demi-sphères sont polies et dorées sur leurs faces externes. Comme on le verra dans au Chapitre IV, l'abaissement de l'émissivité provoquée par cette dorure a pour but de favoriser son homogénéisation en température. La dorure permet également d'assurer la protection de la cellule contre l'oxydation.

En revanche, les surfaces internes sont rugueuses et peintes en noir avec la peinture Nextel Velvet Coating 811-21®. L'émissivité totale normale de cette peinture est de 0,97, elle est indépendante de la température [Tang-Kwor2001], et varie peu dans la gamme de longueur d'onde allant de 0 à 15 μm [Ogarev2009]. On cherche ainsi à rendre l'intérieur de cette cellule semblable à un corps noir. De cette manière, le facteur d'absorption du rayonnement thermique (i.e. émissivité totale hémisphérique) de cette surface est maximum.

3.2.2. Caractéristique de l'objet à tester

Les objets à tester (e.g. composants de puissance) peuvent être de géométrie variée, et bien évidemment d'une taille maximale capable de rentrer dans la cellule sans réaliser un contact thermique avec cette dernière. La masse de ces objets est limitée à 1 kg par le système d'accrochage. Le composant doit être muni d'un système d'accrochage approprié.

Afin de limiter les fuites thermiques par conduction, le support du composant est un fil en constantan de 0,1 mm de diamètre (Figure 15). La composition de ce fil est considérée comme étant de 55% en cuivre et 45% en nickel ; sa conductivité thermique égale à $29,2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ et sa chaleur massique égale à $464 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 27 °C [Sundqvist1992].

Une des extrémités de ce fil est réglable pour maintenir le composant en position centrée à l'intérieur de la cellule.

3.3. Puits de chaleur

Le puits de chaleur est réalisé en pratique sous la forme d'un réservoir d'azote liquide en acier inoxydable 304L de géométrie cylindrique (Figure 14). L'autonomie du réservoir est estimée à 48 heures pour une puissance moyenne absorbée de 20 W. Or, la puissance générée au niveau de la cellule de mesure ne dépasse pas 10 W et celle qui entre dans le calorimètre est inférieure à 5 W pour une température extérieure fixée à 300 K (Chapitre IV, § 2.1). L'autonomie de notre réservoir d'azote est donc beaucoup plus importante.

3.4. Vecteur de chaleur

Nous avons utilisé le terme "vecteur de chaleur" pour désigner tous les éléments qui contribuent à l'évacuation de la chaleur de la cellule de mesure. Le vecteur de chaleur est constitué principalement de l'écran horizontal H, du support de la cellule au réservoir et des amenées de courant.

3.4.1. Ecran thermique horizontal H

L'écran thermique H est en acier inoxydable 304L poli (Figure 15). Il a pour rôle de limiter le flux thermique direct rayonné par le réservoir d'azote sur la cellule de mesure, ce flux étant susceptible de créer des inhomogénéités thermiques sur la cellule.

Cependant, l'écran H constitue un puits de chaleur au flux thermique rayonné par la cellule de mesure, il a aussi pour rôle de faciliter le chauffage de cette dernière, comme nous le verrons dans le Chapitre IV.

3.4.2. Support de la cellule de mesure

Une première demi-sphère, dénommée demi-sphère fixe, est reliée au puits de chaleur par un support en tube composite fait d'époxy et de fibre de verre.

Le tube a un diamètre extérieur de 12 mm et un diamètre intérieur 8 mm, il a un rôle mécanique et thermique. En effet, sa forte résistance thermique permet de limiter l'évacuation du flux thermique par conduction entre la cellule et le puits de chaleur permettant ainsi de limiter les inhomogénéités thermiques sur la cellule. Cependant, l'usage d'un tube réalisé dans un matériau ayant une meilleure conductivité thermique, peut être intéressant pour améliorer la dynamique thermique de la cellule. La seule contrainte sur la nature du matériau du support est de limiter les inhomogénéités thermiques sur la cellule de mesure. L'influence de la nature du support sur la dynamique et l'homogénéisation thermiques de la cellule sera illustrée par expérimentation au Chapitre V. L'analyse des résultats permettra de définir la nature du matériau présentant un meilleur compromis entre une dynamique thermique rapide et une limitation des gradients de température sur la cellule.

La connexion entre la demi-sphère fixe et la tige est effectuée à l'aide d'une pièce usinée dans le cuivre (pièce de raccord, Figure 15). La pièce de raccord possède des orifices de 3 mm de diamètre permettant avec le tube une mise sous vide de l'intérieur de la cellule.

3.4.3. Amenées de courant

L'amenée de courant portée au potentiel haut (nécessaire à l'alimentation électrique du composant) traverse la cellule au moyen d'un adaptateur BNC haute tension de numéro de référence 1959610, fournie par Farnell. Cet adaptateur BNC admet jusqu'à des tensions de 3,5 kV RMS et 5 kV en DC. Le retour de masse est assuré par une liaison équipotentielle entre le composant et la cellule. La cellule est elle-même reliée à la masse de l'alimentation.

Les amenées de courant entraînent des fuites thermiques par conduction et par rayonnement entre le composant et la cellule de mesure d'une part et entre la cellule et le réservoir d'azote d'autre part.

Les tentatives de réduction de ces fuites thermiques ont conduit à effectuer des choix sur les matériaux utilisés. Ainsi, les amenées de courant situées à l'extérieur de la cellule de mesure sont en cuivre de propriétés thermiques considérées comme identiques à celles données au paragraphe 3.1.3, tandis que celles situées à l'intérieur sont en constantan de propriétés thermiques similaires à celles du support du composant. La résistivité électrique de ces matériaux sont de $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ pour le cuivre (Centre d'Information sur le Cuivre, Laiton et Alliages CICLA) et $49 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ pour le constantan. Malgré la forte résistivité électrique du constantan par rapport au cuivre, sa situation à l'intérieur de la cellule est due aux faibles déperditions thermiques par conduction provoquées par ce matériau, comme cela est illustré au Chapitre IV. Aussi, afin de figer les fuites thermiques pour une meilleure réalisation du principe de mesure différentielle, des thermalisations des amenées de courant sont effectuées sur la cellule d'une part et sur le réservoir d'azote d'autre part.

i. Thermalisation de l'amenée de courant au potentiel haut sur la cellule

Cette thermalisation est réalisée par soudure sur une plaque de Thermal Clad® (Figure 15) de 150 μm d'épaisseur. Cette plaque est constituée d'un film mince pris en sandwich entre deux plaques de cuivre. Ce film mince a pour particularité d'être à la fois un bon isolant électrique (Tension de claquage : 11 kV [Bergquist2009]) et un relativement « bon » conducteur thermique (conductivité thermique = $2,2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

La soudure étant susceptible de déformer la cellule de mesure, la plaque de thermal Clad® est soudée sur une plaque de cuivre OFHC de 10 mm d'épaisseur. L'ensemble est ensuite collé sur la demi-sphère fixe de la cellule de mesure à l'aide de la colle Eccobond® 285, cette colle a une conductivité thermique de $1,44 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ et elle est exploitable dans la gamme de température allant de $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ à $+155 \text{ }^\circ\text{C}$ [Emerson2003].

L'adaptateur BNC servant de passage aux amenées de courant passe à travers la plaque de thermalisation collée sur la cellule pour déboucher à l'intérieur de cette dernière.

ii. Thermalisation des amenées de courants sur le réservoir d'azote

La thermalisation des amenées de courant sur le réservoir d'azote est réalisée en ceinturant les fils au réservoir.

3.5. Récapitulatif des dimensions des constituants du calorimètre

Les dimensions des principaux constituants du calorimètre sont rappelées dans le Tableau 2.

	Diamètre ext. [mm]	longueur [mm]	largeur [mm]	Épaisseur [mm]	Matériaux
Plaque de styrodur®		600	600	100	Polystyrène extrudé
Enceinte à vide	280	950		1	Acier 304L
Ecran vertical E	260	900		1	Cuivre poli et doré
Ecran horizontal H	245			0.8	Acier 304L
Réservoir d'azote	240	350		1	Acier 304L
Support de la cellule	12	180		1	Epoxy fibre de verre
Cellule de mesure	200			10	Cuivre
Support du composant	0,1	22			Constantan

Tableau 2 : Récapitulatif des dimensions des principaux constituants du calorimètre

3.6. Récapitulatif des propriétés des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans le calorimètre et leurs propriétés thermiques à 300 K sont synthétisés dans le Tableau 3.

Matériaux	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Chaleur massique [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Cuivre	389	385
Cuivre OFHC	392,3	389,4
Constantan	29,2	464
Acier inox 304L	15,3	477
Epoxy fibre de verre	0,86	998,7
Styrodur®	0,034	

Tableau 3 : Synthèse des propriétés thermiques à 300 K des matériaux utilisés dans le calorimètre

4. Instrumentation

L'exploitation du dispositif repose sur une instrumentation composée : d'éléments chauffants, de capteurs de température, d'un régulateur, d'un groupe de pompage, d'un système de levage et d'un dispositif d'ouverture des demi-sphères. Le lecteur trouvera dans les paragraphes suivant une présentation détaillée de ces différents types d'instrumentation.

4.1. Eléments chauffants de la cellule

Les éléments chauffants de la cellule de mesure sont des résistances bifilaires de référence ZZEAc10/10-120/Ti/CB10 fournis par THERMOCOAX® (Figure 16).

Pour un chauffage localisé uniquement au niveau de la cellule de mesure, les fils chauffants utilisés sont constitués d'une partie chaude en nickel-chrome de 1,1 m de long et d'une partie froide en cuivre de 0,1 m de long. Les conducteurs de ces fils sont noyés dans un isolant minéral en poudre fortement comprimée, l'ensemble est recouvert par une gaine en acier inoxydable AISI 304L (Figure 16).

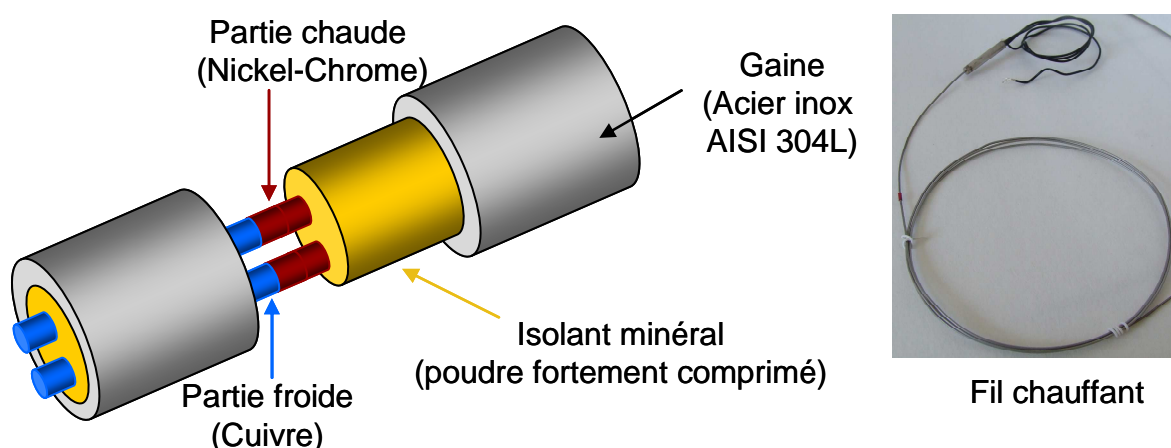


Figure 16 : Constitution de l'élément chauffant qui est inséré dans la cellule de mesure

La résistance électrique linéique de chaque fil chauffant est de 62,5 Ω m⁻¹ à 20 $^{\circ}$ C, son coefficient de température de résistivité entre 0 $^{\circ}$ C et 100 $^{\circ}$ C est fixé à 10⁻⁴ $^{\circ}$ C⁻¹. Ainsi, pour nos éléments chauffants, la résistance électrique équivalente est de 75 Ω par fil chauffant. La mesure de cette résistance à l'aide d'un multimètre de type

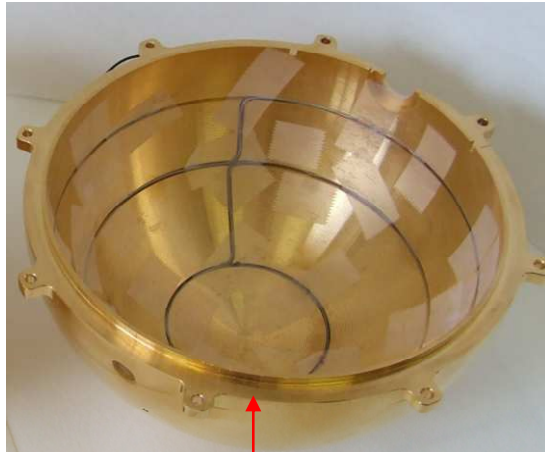
MANUDAX M-4650 nous a fourni une valeur de $75,5 \Omega$ pour les deux fils chauffants. Cette mesure est juste au sens métrologique la tolérance sur la résistance étant de 10 %.

La puissance linéique maximale de notre fil chauffant est limitée à 100 W m^{-1} et sa température de fonctionnement peut s'élever jusqu'à $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pour une meilleure répartition de l'énergie thermique générée par le fil dans la cellule de mesure, nous avons placé un fil chauffant dans chaque demi-sphère. Chaque fil chauffant est inséré et enroulé dans la cellule, à l'intérieur d'une rainure, à l'intérieur d'une rainure (Figure 17) de 2 mm de largeur et de profondeur formant un total de trois spires.



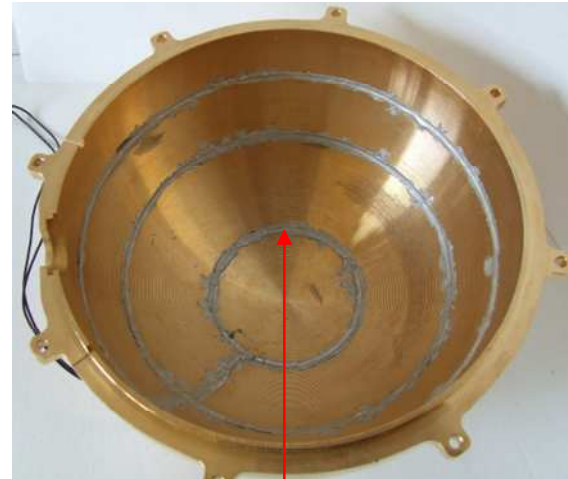
Demi-sphère rainurée



Demi-sphère avec fil chauffant



Fil chauffant avec points de colles



Fil chauffant recouvert de laque d'argent

Figure 17 : Séquences de mise en place du fil chauffant dans la cellule de mesure

Bien qu'une soudure à l'étain procure une meilleure conductivité thermique, pour limiter des risques de déformation géométrique de la cellule nous avons dû opter pour un collage du fil chauffant ; ce dernier est réalisé par point de colle avec du Stycast® 2850 FT Black (Figure 17). La conductivité thermique de la colle utilisée est de $1,1 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [Emerson2004] et elle est exploitable jusqu'à une température de

+175 °C. Nous avons réalisé un essai montrant que cette colle pouvait tenir jusqu'à +200 °C.

Après collage des fils, les rainures sont remplies de laque conductrice à l'argent de type SPI Silver Paint® fournie par Neyco. La conductivité thermique de ce produit est de $4 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, et sa limite d'utilisation en température est de +600 °C.

4.2. Capteurs de températures

Un certain nombre de capteurs a été répartis en différents points névralgiques : cellule de mesure, écrans thermiques E et H, et enceinte à vide. Mais seuls les capteurs situés sur la cellule de mesure sont nécessaires au fonctionnement du calorimètre.

4.2.1. Sondes de platine insérées dans la cellule de mesure

La température de la cellule est déterminée à l'aide de sondes Pt100. Ainsi trois sondes F1, F2 et F3 sont collées sur la demi-sphère fixe et trois autres M1, M2 et M3 sur la demi-sphère mobile (Figure 18). Ces capteurs de température sont logés dans des trous de 2,1 mm de diamètre et 5 mm de profondeur réalisés dans l'épaisseur de la cellule. Cette répartition sur la cellule de mesure permet de contrôler l'homogénéité de la température. Mais, seul l'un de ces capteurs servira à la régulation.

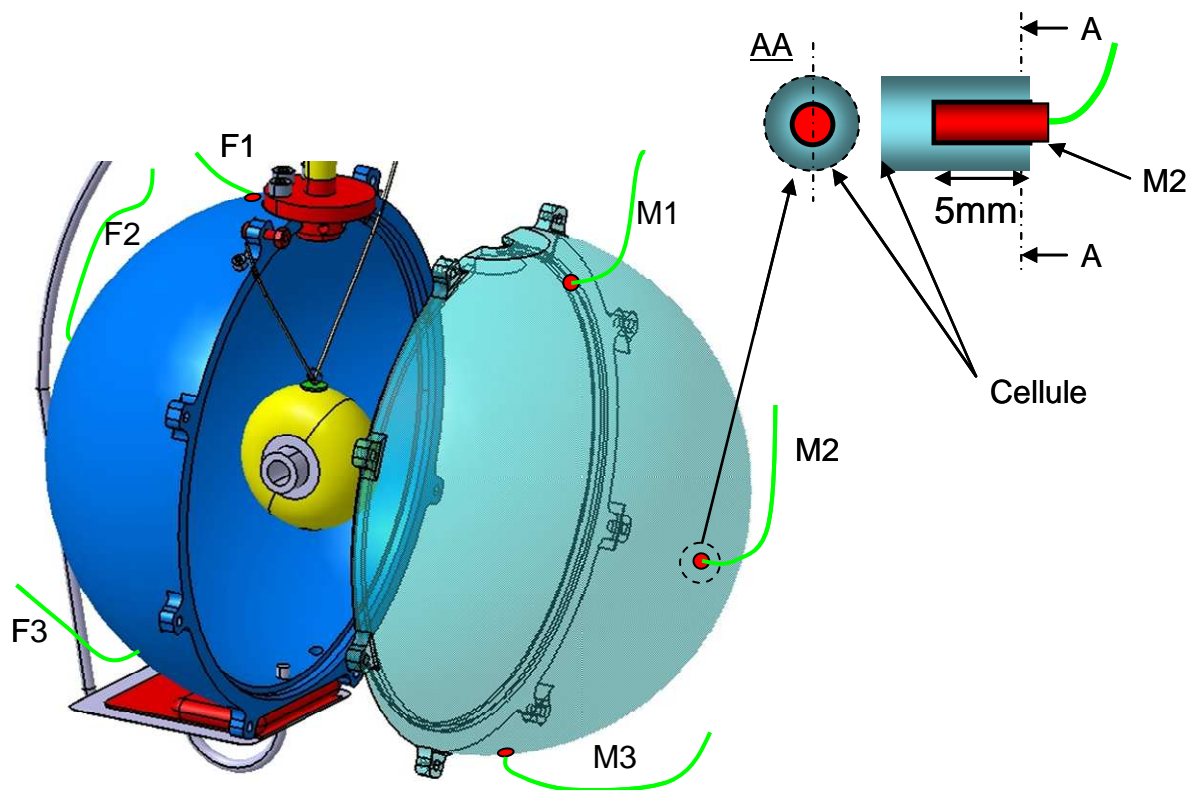


Figure 18 : Six sondes cylindriques Pt100 (M1, M2, M3, F1, F2 et F3) sont insérées dans des trous creusés dans l'épaisseur de la sphère et collés à l'aide d'une colle de type Eccobond®

Les sondes Pt100 utilisées, sont de géométrie cylindrique de 6 mm de long et 2 mm de diamètre, leur classe de tolérance est 1/3DIN B suivant la norme EN 60 751

[Jumo2009]. L'erreur systématique absolue sur la température mesurée par ces capteurs Pt100 en fonction de la température est donnée par la relation (22)

$$\Delta T = \pm \frac{1}{3} (0,3 + 0,005 \times |T|) \quad (22)$$

où T est la température mesurée en degrés Celsius (°C).

Nos sondes Pt100 ont une connexion quatre fils, le mode "4 fils" permet d'améliorer la précision des mesures et de limiter l'influence des perturbations électriques environnantes. Ainsi, la mesure de tension est réalisée directement au niveau de la partie active de la sonde et ce, grâce à une interface haute impédance. Par conséquent, les résistances des câbles de connexion ne peuvent pas entraîner d'erreur de mesure.

Nos sondes Pt100 peuvent fonctionner dans une gamme de température allant de -200°C à +800°C, mais leur classe de tolérance 1/3DIN n'est applicable que dans la gamme -70°C à +250°C. Cette plage de température inclut notre gamme de mesure.

Dans la plage de température comprise entre -200°C et 0°C, la résistance R(T) de la sonde en fonction de la température T en degré Celsius (°C) répond à l'équation (23).

$$R(T) = R_0 [1 + aT + bT^2 + c(T - 100^\circ\text{C})T^3] \quad (23)$$

où R_0 est la valeur prise par R(T) à 0°C ($R_0 = 100\Omega$), les coefficients a, b et c sont respectivement égaux à $3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ et $-4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ selon la norme EN 60 751.

Pour les températures comprise entre 0°C et +850°C, la résistance R(T) de la sonde Pt100 répond à l'équation (24).

$$R(T) = R_0 [1 + aT + bT^2] \quad (24)$$

Les relations (23) et (24) sont appelées équations de Callendar-Van Dusen.

Le calcul de la variation de la résistance de la Pt100 ΔR en Ω à une température $T > 0^\circ\text{C}$ est donnée par (25).

$$\Delta R = R_0 (a + 2bT) \times \Delta T \quad (25)$$

Pour une température $T < 0^\circ\text{C}$, l'écart ΔR est donné par (26).

$$\Delta R = R_0 (a + 2bT - 300^\circ\text{C} \times cT^2 + 4cT^3) \times \Delta T \quad (26)$$

La résistance électrique des sondes Pt100 est considérée comme étant quasiment linéaire dans la gamme de température allant de 0 °C à 100 °C.

4.2.2. Thermocouples sur écrans thermiques E et H, et enceinte à vide

La mesure des températures sur les écrans thermiques et sur l'enceinte à vide est effectuée à l'aide de thermocouples de types K. Ces capteurs de température sont de classe 1 et fonctionnent dans une gamme de température allant de -50 °C à +250 °C [Radiospares2006].

La Figure 19 montre les différents emplacements des thermocouples sur les écrans E et H et sur l'enceinte à vide. Ces capteurs de température permettent d'apprécier les gradients thermiques sur les différents éléments du calorimètre.

Les thermocouples de l'écran E (T_{E1} et T_{E2}) et de l'écran H (T_H), sont collés avec du scotch kapton pour une bonne tenue à très basses température ($< -70\text{ °C}$), les surfaces de ces éléments étant lisses, ceux de l'enceinte à vide (T_{V1} et T_{V2}) sont collés à l'aide du Stycast® 2850 FT Black.

L'affichage des températures mesurées par les thermocouples est effectué à l'aide d'un boîtier *EIRELEC® LTO BETA* pouvant afficher les valeurs de température mesurées par dix (10) thermocouples à la fois. La précision de cet appareil est de l'ordre de $\pm 0,1\text{ °C}$ dans une gamme de température correspondant à celle des thermocouples K utilisés.

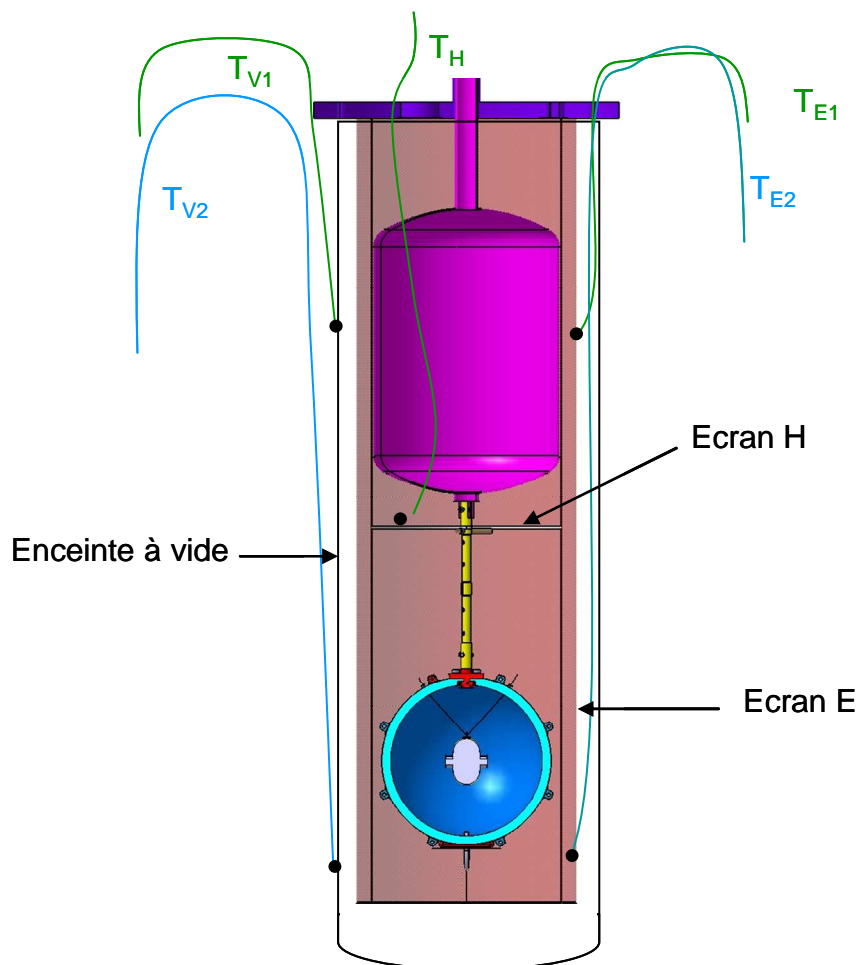


Figure 19 : Cinq thermocouples de type K sont répartis sur les écrans et l'enceinte à vide

4.3. Régulateur de température

Le régulateur de température de la cellule de mesure est un élément incontournable dans le principe de fonctionnement de notre calorimètre. La précision des mesures du dispositif calorimétrique dépend fatalement de la précision de la puissance fournie à la cellule de mesure en vue de la maintenir à une température donnée. Nous présentons ici les caractéristiques et le mode de fonctionnement de notre régulateur.

Le régulateur de température de la cellule de mesure du calorimètre, est de type PTC10-Programmable Temperature Controller de Stanford Research Systems (Figure 20). Sa température d'exploitation s'étend de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une résolution inférieure à 10^{-3} K . La précision sur la température est de $\pm 0,03\text{ K}$ et la puissance maximale à la sortie est de 50 W .

Notre régulateur de température permet d'afficher simultanément quatre températures mesurées par quatre sondes Pt100 en connexion quatre fils. Il adopte le même mode de fonctionnement avec les sondes de type thermocouples [Stanford2008].

Cependant, la régulation de température est réalisée sur un seul des quatre capteurs et permet par ailleurs de prendre en compte la caractéristique en fonction de la température des capteurs utilisés pour affiner leur comportement. Il permet également l'introduction d'un offset pour chaque capteur lorsque cela est nécessaire. La puissance électrique fournie par PTC10® est directement accessible et permet donc de mettre en œuvre notre principe de mesure.



Figure 20 : Photographie des faces avant et arrière du régulateur de température de la cellule de mesure

La régulation est réalisée par une fonction Proportionnel Intégrateur Dérivateur (PID) en chaîne directe et une boucle de rétroaction. Cette boucle rétroactive combine trois algorithmes pour calculer la puissance thermique optimale à chaque instant donné.

La Figure 21 montre un synoptique de la régulation PID. La commande prend en compte les trois algorithmes du proportionnel, de l'intégrateur et du dérivateur (PID).

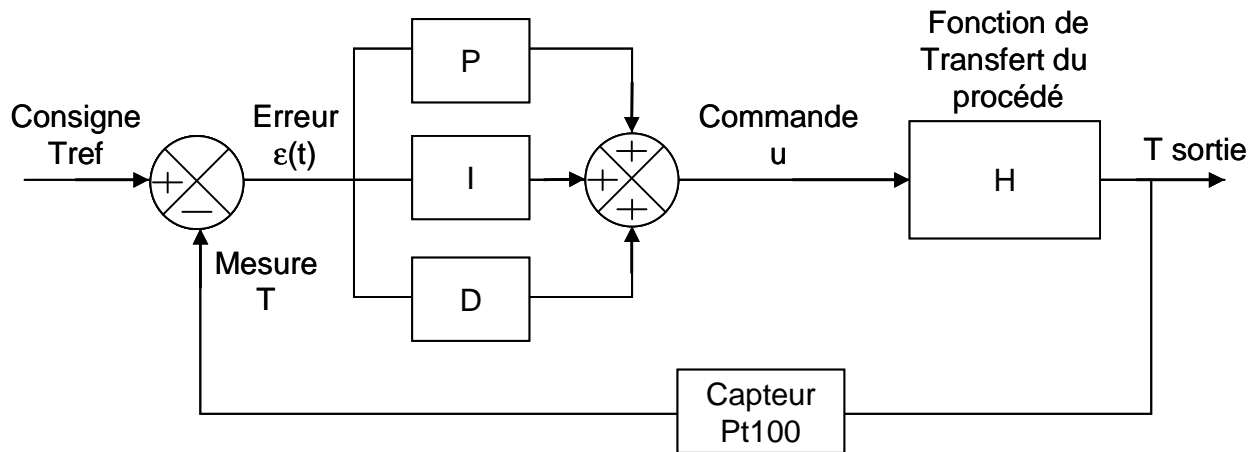


Figure 21 : Schéma fonctionnel de la régulation de température

L'algorithme de rétroaction du proportionnel détermine l'erreur $\varepsilon(t)$ (i.e. la différence entre la température désirée T_{REF} (consigne) et la température mesurée $T(t)$), en fonction du temps (27). La sortie de cet algorithme Y_p est égale à l'erreur multipliée par une constante P (28).

$$\varepsilon(t) = (\text{consigne} - T(t)) \quad (27)$$

$$Y_p(t) = P \times \varepsilon(t) \quad (28)$$

La constante P tend vers zéro pendant que la température réelle $T(t)$ approche la valeur de la consigne T_{REF} . Cependant la rétroaction du proportionnel ne peut pas en général maintenir la température à la valeur consignée.

Ensuite, l'algorithme de rétroaction de l'intégrateur multiplie l'erreur par une constante (K_i) et additionne le résultat à la sortie prévue par l'intégrateur (29).

$$Y_i = K_i \times \varepsilon(t) + I(t-1) \quad (29)$$

Pendant que la température mesurée approche la consigne, le taux de variation à la sortie de l'intégrateur I chute à zéro. En effet, la rétroaction de l'intégrateur maintient la puissance thermique en état stationnaire.

Enfin, la rétroaction du dérivateur tente de prédire la valeur de la température à l'instant t^+ en multipliant le taux de variation de la température mesurée par une autre constante D (30).

$$Y_d(t) = D \times (T(t-1) - T(t)) \quad (30)$$

Quand la température augmente, la rétroaction du dérivateur réduit le courant dans la résistance chauffante, quand la température diminue, cette rétroaction augmente le courant dans l'élément chauffant.

En définitive, la puissance thermique est la somme de trois algorithmes de rétroaction (31).

$$\Phi_{Cal} = Y_p(t) + Y_i(t) + Y_d(t) \quad (31)$$

En générale, quand les gains du proportionnel et de l'intégrateur augmentent, la boucle de rétroaction répond très rapidement et la température mesurée talonne au plus près la consigne.

4.4. Système de levage et d'ouverture

Le système de levage de la bride du calorimètre fourni par Baret S.A est présenté à la Figure 22.

L'axe Z du système de levage est fixé sur le mur. Il a une course de 1200mm permettant de faire sortir le système cellule - réservoir à une hauteur de 200mm au dessus de l'enceinte à vide et peut supporter une charge de 50kg avec un déport de 350mm. Sur cet axe, le levage du couvercle est automatisé par un moteur triphasé de 180W-5A, ayant une vitesse de 20mm/s.

Deux systèmes de fin de course mécanique NO/NF permettent de limiter à des niveaux fixes précis les hauteurs minimale et maximale de déplacement de la bride de l'enceinte à vide.

Quant à l'axe Y, il est relié au couvercle calorimétrique par l'intermédiaire de deux tubes en inox à l'intérieur desquelles passe une tige filetée, cette dernière est vissée sur le couvercle. La position centrée sur l'axe de révolution de l'enceinte à vide du système calorimétrique est atteinte grâce au réglage de l'abscisse y à partir du volant situé à l'extrémité de l'axe Y.

Le système d'ouverture de la cellule est présenté à la Figure 23. Les quatre tiges en inox servent de rails à la demi-sphère mobile, ainsi, lors de l'ouverture de la cellule de mesure, les vis correspondantes aux positions des tiges sont défaits et remplacées par ces dernières.

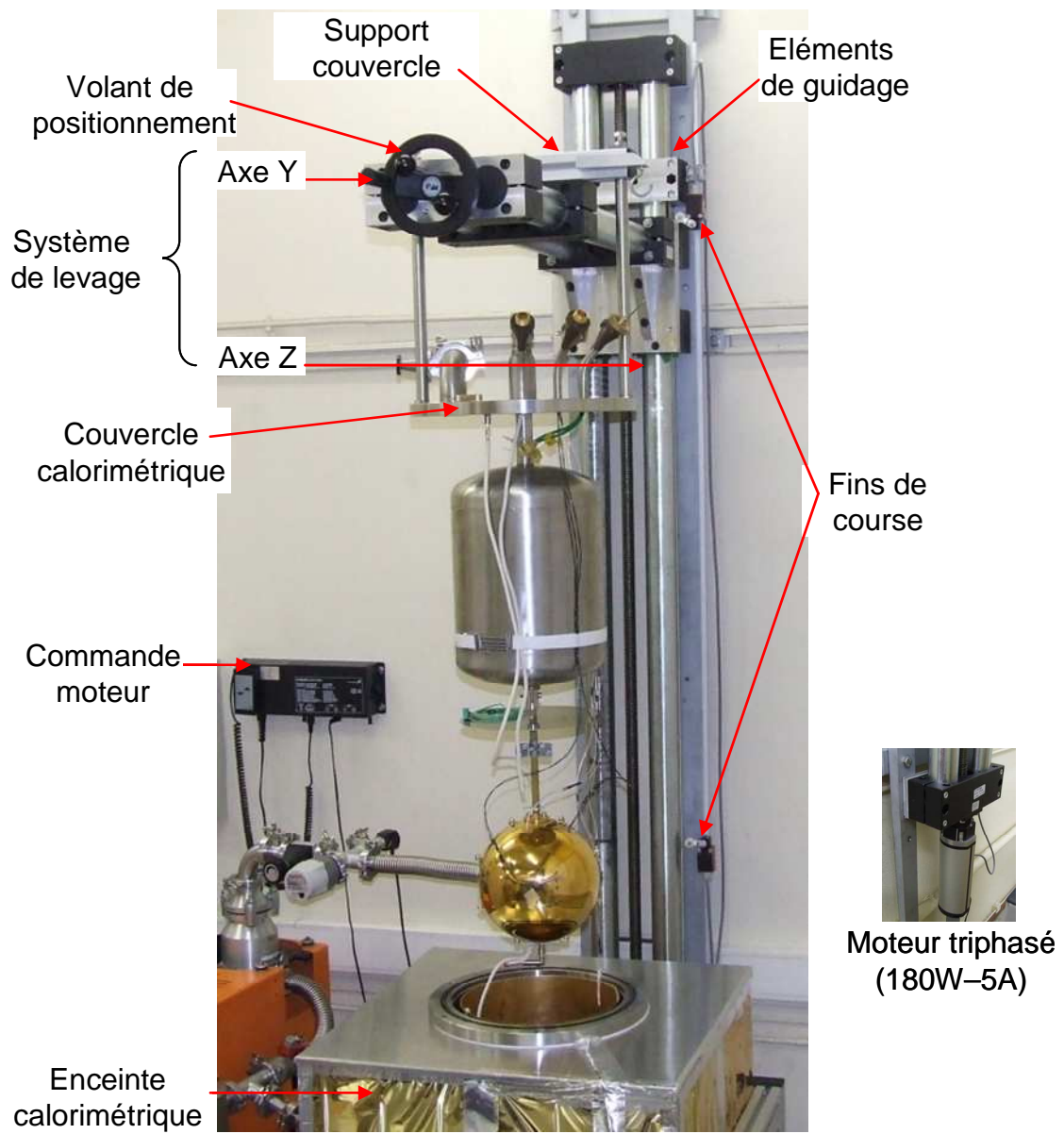


Figure 22 : Photographie du système de levage du couvercle calorimétrique

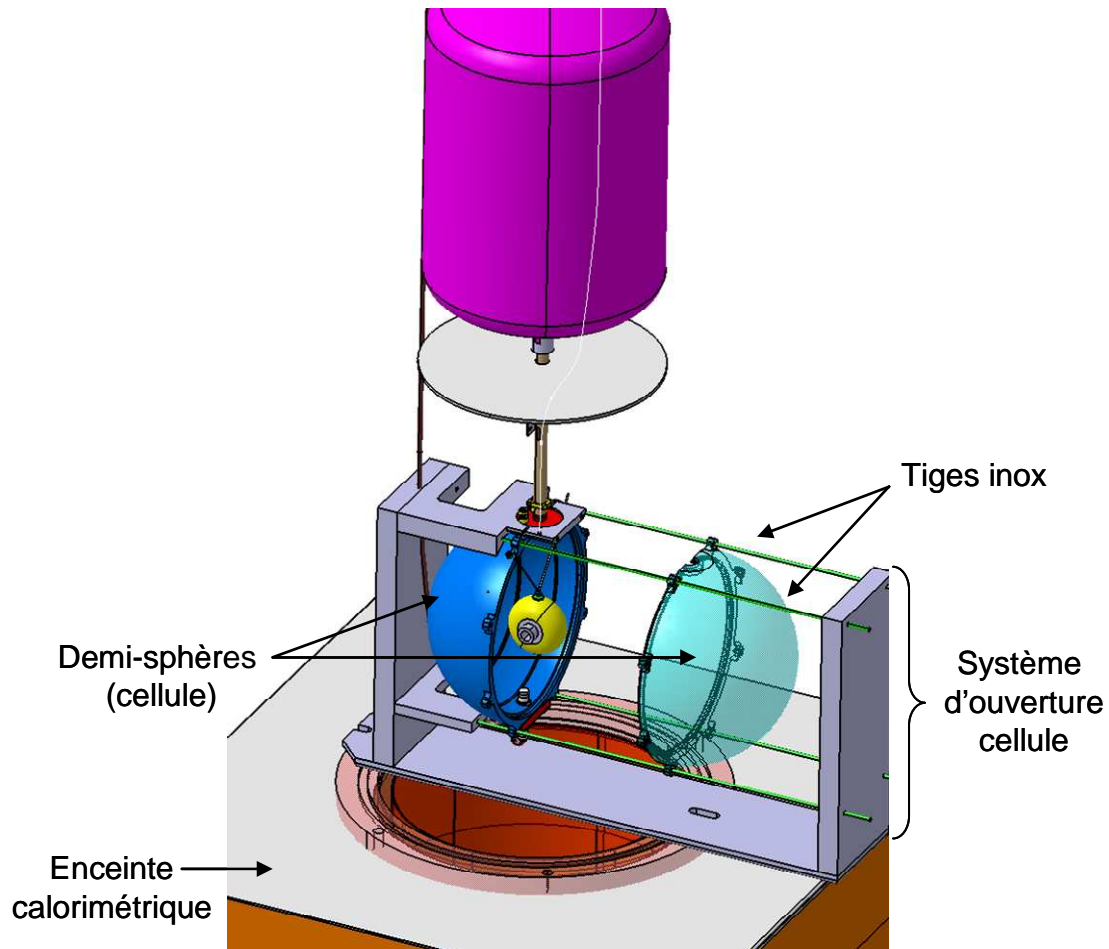


Figure 23 : Vue détaillée du support d'assemblage des deux demi-sphères de la cellule de mesure

4.5. Groupe de pompage

Le vide de travail dans l'enceinte est atteint à l'aide d'une pompe turbo moléculaire (Alcatel CFV 100®) assistée d'une pompe primaire de la même marque. La pression résiduelle dans l'enceinte à vide du calorimètre atteint une valeur de $5 \cdot 10^{-6}$ mbar lorsque le réservoir est rempli d'azote liquide. Cette pression résiduelle est atteinte au bout de 36 heures de pompage.

Le circuit de pompage de notre enceinte à vide est illustré par la Figure 24. Il est constitué en plus de la pompe primaire et de la pompe turbo, de quatre vannes V1, V2, V3 et V4. La vanne V1 permet la prise d'air au niveau de la pompe primaire. La vanne V2 permet de réaliser au besoin un découplage entre la pompe primaire et la turbo, sa position permet de limiter les remontées d'huile dans cette dernière. La vanne V3 permet de maintenir le dispositif calorimétrique sous vide même en l'absence de pompage et la vanne V4 a pour rôle de casser le vide secondaire à l'azote U. Le contrôle de la pression est assuré par les jauges de piranie ($> 10^{-3}$ mbar) et de penning ($< 10^{-3}$ mbar).

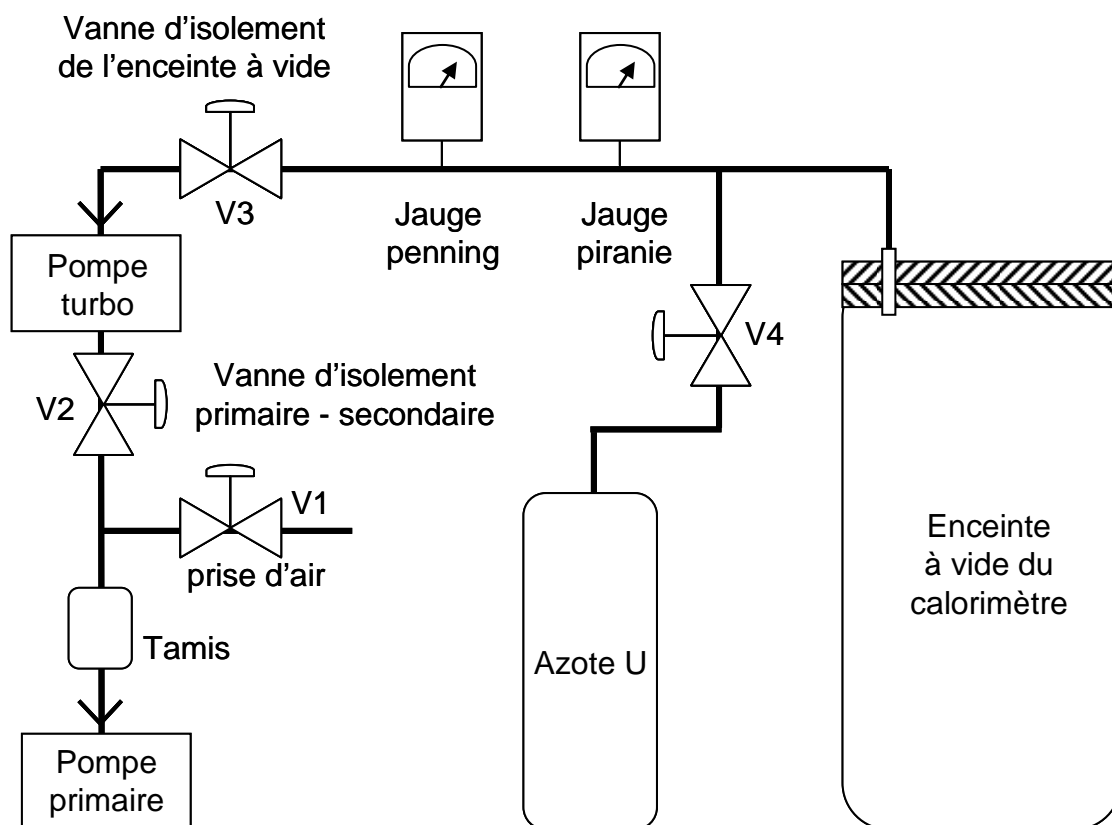


Figure 24 : Schéma du circuit de pompage permettant d'assurer un vide secondaire dans l'enceinte du calorimètre

4.6. Synthèse métrologique

La mesure des faibles pertes de puissance nécessite des instruments de chauffage, de mesure de température et de régulation à haute résolution. Les éléments que nous avons présentés ont donc été précautionneusement sélectionnés.

Seules les mesures expérimentales permettront de mettre en évidence la robustesse du dispositif face aux perturbations potentielles telles que l'alimentation du composant en fréquence.

Le récapitulatif des caractéristiques des instruments utilisés dans le calorimètre est proposé (Tableau 4).

	Etendue de mesure	Domaine de linéarité	Sensibilité	Résolution R, et précision P	Rapidité (r) et temps de réponse (t)
Résistance chauffante	75,5Ω			P=±0,7%	
Pt100	-70°C à +100°C	0°C à 100°C	A partir de (23) et (24)	P=1/3DIN (EN 60 751)	
Thermocouple type K	-250°C à 1370°C		39μV/°C à 0°C	P=±0,1°C	r < 1ms
Régulateur	-200°C à 550°C			R < 1mK P=±30mK	r=75mn

Tableau 4 : Résumé des principales caractéristiques des instruments de chauffage, de mesure et de régulation de température de la cellule de mesure

5. Conclusion

Le dispositif calorimétrique réalisé ici est basé sur une méthode de mesure différentielle. La chaleur générée par le composant (éprouvette testée) est transférée à la cellule de mesure par rayonnement thermique. Ce mode d'échange permet de s'affranchir de la géométrie du composant. Ainsi, les principales fonctions mises en œuvre sont : une source de chaleur, une source froide, un vecteur de chaleur et enfin un système d'isolation permettant de limiter des perturbations du milieu extérieur au calorimètre.

L'architecture du calorimètre présentée dans ce chapitre a été largement influencée par le travail de modélisation des échanges thermiques (Chapitre III)

La caractérisation des composants à faible pertes de puissance nécessite une instrumentation adaptée. Chaque élément a donc été précautionneusement sélectionné et caractérisé.

6. Références

- [Bergquist2009] Bergquist company, "Thermal Clad selection guide", Sept. 2009.
- [Child1973] G. Child, L.J. Erics, R.L. Powell "Thermal Conductivity of Solids at Room Temperature and Below", NBS Monograph 131, 1973.
- [Douglas1979] Ed. Douglas Mann "LNG Materials and Fluids", National Bureau of Standards, Cryogenics Division First Edition 1977. Jan.1979.
- [Emerson2003] Emerson & Cuming "ECCOBOND® 285 Thermally Conductive, Epoxy Paste Adhesive", *Technical data Sheet*.
- [Emerson2004] Emersion & Cuming, Stycast® 2850 FT two component versatile epoxy encapsulant with high thermal Conductivity, *Technical data*, National starch & Chemistry company, 2004.
- [Hust1984] J.C. Hust "Thermal Conductivity Of Glass Fiber/Epoxy Composite Support Bands For Cryogenic Dewars", Phase II NBS, Boulder 1984.
- [Jumo2009] JUMO Régulation S. A. "Eléments sensibles en platine sous céramique suivant EN 60 751", *Fiche technique* 90.6022, Janvier 2009.
- [Marquardt2000] E.D. Marquardt, J.P. Le, and Ray Radebaugh, "Cryogenic Material Properties Database", 11th International Cryocooler Conference, 2000.
- [Ogarev2009] S. Ogarev, M. Samoylov, V. Sapritsky, A. Panfilov, " Low-Temperature Blackbodies for IR Calibrations in a Medium-Background Environment", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 30, pp. 77-97, Feb, 2009.
- [Radiospares2006] Radiospares, "Thermocouple, isolé PTFE pointe soudée K", 2006
- [Seguin1997] B. Seguin, J. P. Gosse, "Dispositif de mesure calorimétrique des pertes dans les condensateurs de puissance", *Journal de Physique III France*, Vol.7, pp.321-336, 1997.
- [Simon1992] N.J. Simon, E.S. Drexler, R.P. Reed "NIST Monograph 177 Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperature", p. 7-23, February 1992.
- [Stanford2008] Stanford Research Systems, "PTC10 programmable temperature controller", *user manual*, version 1.1, 2008.
- [Sundqvist1992] Bertil Sundqvist, "Thermal diffusivity and thermal conductivity of Chromel, Alumel, and Constantan in the range 100 – 450K", *Journal of Applied Physics*, Vol.72, pp.539 – 545, July 1992.
- [Tang-Kwor2001] Eric Tang-Kwor, Simone Matteï "Emissivity measurements for Nextel Velvet Coating 811-21 between -36 °C and 82 °C", *High Temperatures - High Pressures*, Vol.33, Issue5, pp.551–556, 2001.
- [Thermeau2004] Jean-Pierre Thermeau "Propriétés des matériaux à basse température", 5ème rencontre nationale des mécaniciens du CNRS, Juin 2004.
- [Touloukian1976] Y.S Touloukian, C.Y. Ho "Thermophysical Properties of Selected Aerospace Materials", Part II: Thermophysical Properties of Seven Materials, Editors 1976, pp.39-46.

Chapitre III Etude théorique des transferts de chaleur

1. Introduction

L'architecture du nouveau calorimètre présentée au Chapitre II a été définie et optimisée à la lumière de l'étude théorique des transferts de chaleur détaillée dans ce chapitre.

Ce modèle a pour but d'évaluer la mesure des pertes de puissance d'un composant par rayonnement. Il permet également d'évaluer l'influence de la géométrie et des propriétés des constituants. Ceci dans le but d'orienter les choix de matériaux et d'estimer la sensibilité théorique du nouveau dispositif.

Nous décrivons le modèle analytique des échanges de chaleur des sous-systèmes du calorimètre en nous appuyant sur les notions élémentaires de transfert thermique.

2. Notions élémentaires de transfert thermique

Les mesures calorimétriques sont basées sur les phénomènes de transferts de chaleur dont nous rappelons préalablement les concepts fondamentaux.

Dans la suite de ce mémoire, les grandeurs vectorielles seront notées en gras.

2.1. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution spatio-temporelle de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. On distingue deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit stationnaire.
- Champ de température dépendant du temps : le régime est dit variable ou transitoire.

2.2. Gradient de température

La dérivabilité de la fonction $T = f(x, y, z, t)$ permet de définir en chaque point M à chaque instant t un vecteur gradient de température **gradT** normal en M à la surface isotherme (Figure 25).

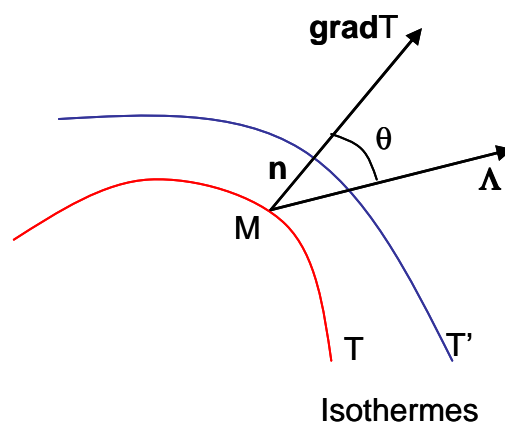


Figure 25 : Isotherme et gradient thermique, T et T' sont des surface isothermes, n est le vecteur unitaire de la normale à la surface isotherme T au point M et Λ est un vecteur unitaire désignant une direction donnée passant par M et faisant un angle θ avec la normal n

En coordonnées cartésiennes, le gradient de température a pour composante :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

où $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$ et $\frac{\partial T}{\partial z}$ sont respectivement les dérivées partielles de la température suivant x, y et z.

On définit également le gradient de température dans une direction Λ comme le produit scalaire (32).

$$\vec{\text{grad}}T \cdot \vec{\Lambda} = \|\vec{\text{grad}}T\| \cdot \cos \theta \quad (32)$$

En l'absence de précision le terme gradient désigne celui dans la direction normale à une surface [Reboux2008].

2.3. Chaleur

La chaleur est une forme d'énergie échangée entre deux corps. Ce transfert s'effectue sous forme d'énergie mécanique microscopique, correspondant au degré d'agitation des molécules. Ainsi, lorsqu'un corps reçoit de la chaleur, l'agitation de ses molécules a tendance à s'intensifier, ce qui se traduit la plupart du temps par une augmentation de la température de ce corps.

Cependant, un apport de chaleur peut également provoquer un changement d'état sans élévation de la température : si on chauffe un glaçon, il fond progressivement tout en restant à 0 °C.

Entre deux corps, la chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant donc généralement la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier (deuxième principe de la thermodynamique).

Lorsque l'on met deux corps qui ont des températures différentes en contact, il s'établit au bout d'un certain temps un équilibre et les deux corps finissent par avoir la même température. Quelque chose a été échangé : c'est de la chaleur.

2.4. Conduction thermique

La conduction est le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température au sein d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans aucun transport macroscopique de matière [Jannot2008].

La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction thermique repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux de chaleur ($\vec{\varphi}$ en $W \cdot m^{-2}$) est proportionnelle au gradient de température (33).

$$\vec{\varphi} = -k \times \vec{\text{grad}}(T) \quad (33)$$

où k est une grandeur scalaire positive (pour un milieu isotrope). C'est une caractéristique physico-chimique du milieu considéré. Cette grandeur est désignée sous le nom de conductivité ou conductibilité thermique, elle s'exprime en $W m^{-1}K^{-1}$.

On appelle flux de chaleur, la quantité de chaleur transmise à travers la surface S par (34):

$$\Phi = -\int \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (34)$$

où Φ est le flux de chaleur exprimé en W et \vec{n} la normale extérieure à l'élément de surface dS .

Dans le cas d'un système, les transferts de chaleur sont régis par l'équation générale de la conduction thermique. Dans sa forme monodimensionnelle, cette équation décrit le transfert de chaleur unidirectionnel au travers d'un mur plan.

Considérons un mur d'épaisseur e dans la direction Ox , et de section d'aire S normale à la direction Ox (Figure 26).

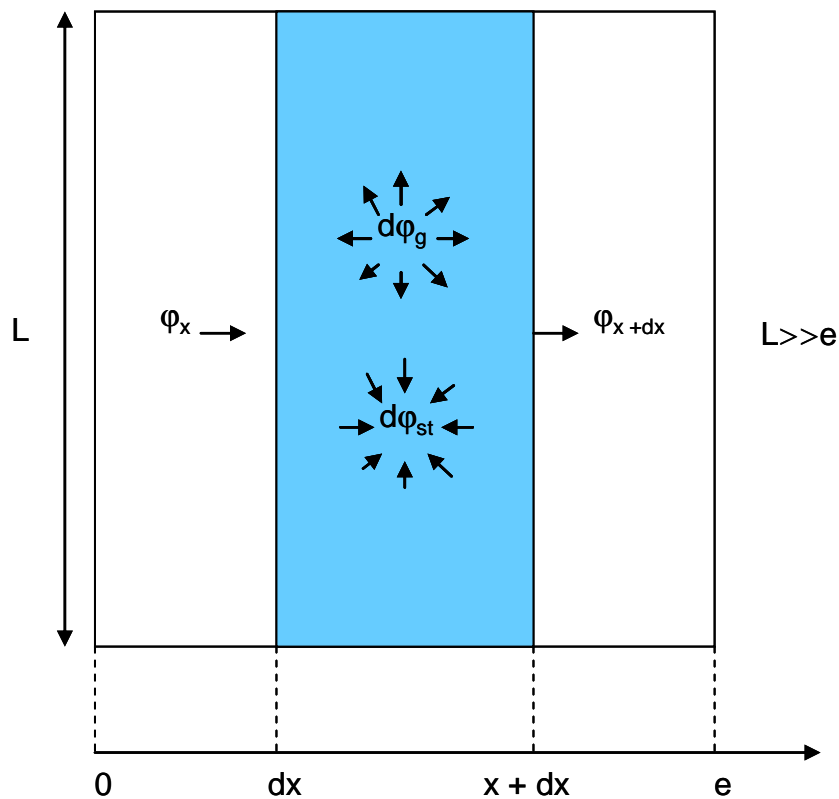


Figure 26 : Bilan de puissance pour un système unidimensionnel : mur d'épaisseur e , de hauteur L et de profondeur infinie

Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit (35) :

$$\Phi_x + \Phi_g = \Phi_{x+dx} + \Phi_{st} \quad (35)$$

avec :

$$\Phi_x = -\left(kS \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \quad (36)$$

$$\Phi_{x+dx} = -\left(kS \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} \quad (37)$$

$$d\Phi_g = PSdx \quad (38)$$

$$d\Phi_{st} = \rho c S dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (39)$$

Dans (36) Φ_x est le flux entrant dans le volume élémentaire $dv = S \cdot dx$, Φ_{x+dx} (37) est le flux sortant de dv . La puissance $d\Phi_g$ (38) est générée dans le volume dv par une source quelconque de densité de puissance P en $W m^{-3}$. $d\Phi_{st}$ (39) est la puissance stockée dans le volume dv . Dans l'équation (39) ρ et c sont respectivement la masse volumique et la chaleur massique du mûr considéré.

En reportant ces expressions dans (35) et en divisant par $S \cdot dx$, on obtient (40) :

$$\frac{\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{dx} + P = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (40)$$

soit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + P = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (41)$$

Dans le cas tridimensionnel, l'équation de la chaleur sous sa forme générale est donnée par (42).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (42)$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

- Si le milieu est homogène et isotrope : $k_x = k_y = k_z = k$;
- S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $P = 0$;
- Si le milieu est homogène : k n'est fonction que de la température T .
- Si de plus k est constant : on obtient l'équation de Fourier (43) :

$$a \cdot \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (43)$$

Le coefficient $a = k/\rho c$ en $m^2 s^{-1}$ est appelé diffusivité thermique et Δ est l'opérateur laplacien.

- Si le régime est stationnaire : on obtient l'équation de Laplace (44).

$$\nabla^2 T = 0 \quad (44)$$

Dans ce cas, le flux est conservatif dans un tube de flux (Figure 27), c'est-à-dire (45).

$$\text{div} \vec{\phi} = 0 \quad (45)$$

Ainsi, pour n'importe quelle surface isotherme appartenant au tube de flux et située à l'abscisse curviligne s on a (46).

$$\Phi = -k(s)A(s)\frac{\partial T}{\partial s} \quad (46)$$

Il vient

$$\frac{ds}{k(s)A(s)} = -\frac{dT}{\Phi} \quad (47)$$

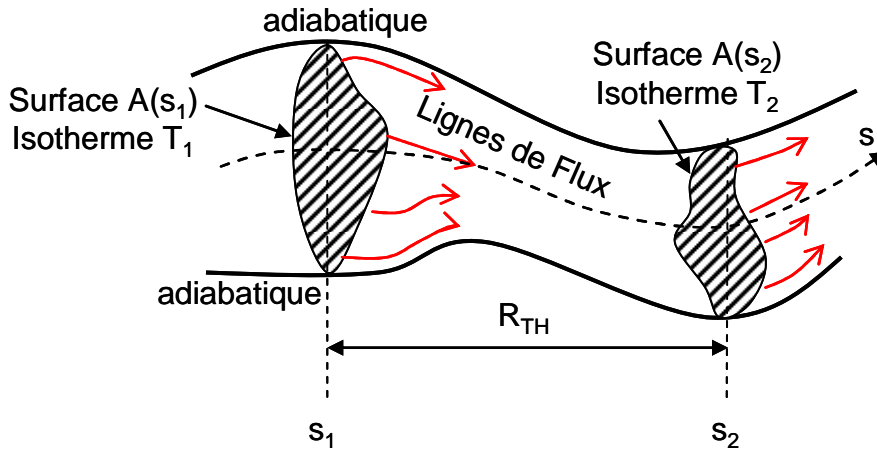


Figure 27 : Représentation d'un tube de flux en régime stationnaire. $A(s_1)$ et $A(s_2)$ sont des sections isothermes à températures respectives T_1 et T_2 , et séparées par une résistance thermique de conduction R_{TH} dont l'expression théorique est donnée par (49)

En intégrant entre les deux surfaces isothermes $A(s_1)$ et $A(s_2)$, on obtient (48).

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{k(s)A(s)} = -\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{\Phi} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} \quad (48)$$

On peut alors réécrire cette relation sous la forme (49).

$$T_1 - T_2 = R_{TH} \Phi \quad (49)$$

avec $R_{TH} = \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{k(s) \times A(s)}$

Le coefficient R_{TH} est appelé « résistance thermique » par analogie avec la loi d'Ohm.

2.5. Convection thermique

Les transferts de chaleur qui s'effectuent avec un mouvement macroscopique de la matière sont dits transferts par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

- la convection libre ou naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).
- la convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause extérieure indépendante des différences de température (pompe, ventilateur).

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. Compte tenu du lien entre le mouvement macroscopique de la matière et le transfert de chaleur, il est nécessaire de prendre en compte le régime d'écoulement du fluide. Dans notre cas, nous nous limitons à la convection naturelle laminaire dans l'air qui s'applique à notre calorimètre.

Cependant, quelle que soit la nature de la convection (libre ou forcée), et quel que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur Φ en convection thermique est calculé à partir de la relation, appelée loi de Newton (50).

$$\Phi = hS \times \Delta T \quad (50)$$

La détermination du flux de chaleur passe nécessairement par le calcul du coefficient d'échange h . Ce dernier dépend d'un nombre important de paramètres : les caractéristiques du fluide et de l'écoulement, la température, la géométrie, la position et l'état de la surface d'échange (i.e. rugueuse ou non).

Le Tableau 5 donne les expressions de h pour l'air en convection naturelle et pour un régime d'écoulement laminaire [Brau2006].

Géométrie et orientation de la paroi	Coefficient de convection laminaire h [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$]	Dimension caractéristique [m]
Plaque verticale dont la hauteur est inférieure à 30cm (ou cylindre vertical)	$h = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{H} \right)^{0.25}$	H : hauteur de la plaque
Plaque verticale dont la hauteur est supérieure à 30cm (ou cylindre vertical)	$h = 1.78 \times \Delta T^{0.25}$	
Cylindre horizontal	$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{D_e} \right)^{0.25}$	D_e : diamètre extérieur du cylindre
Plaque horizontale chauffant vers le haut	$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Plaque horizontale chauffant vers le bas	$h = 0.66 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Sphère	$h = \left(1.14 + \frac{0.17}{D} \right) \Delta T^{0.25}$	D : diamètre de la sphère

Tableau 5 : Coefficients d'échange de l'air en convection naturelle (régime laminaire). ΔT représente l'écart de température entre l'air et la paroi échangeant de la chaleur

2.6. Rayonnement thermique

Le terme *rayonnement thermique* est communément utilisé pour décrire les transferts de chaleur par ondes électromagnétiques.

Tout corps, quel que soit son état : solide, liquide ou gazeux, émet et absorbe les ondes électromagnétique. Ces phénomènes d'absorption et d'émission se font au profit ou au détriment de l'énergie interne du corps. L'intensité et la longueur d'onde d'émission dépendent de la température du corps émissif. Le rayonnement thermique couvre la gamme de longueurs d'onde allant de 0,1 μm à 100 μm .

Dans l'étude du rayonnement thermique, on est amené à définir plusieurs grandeurs radiométriques fondamentales. Ces grandeurs peuvent être :

- monochromatiques (pour les longueurs d'onde comprises entre λ et $\lambda+d\lambda$) ou totales (par intégration sur toutes les longueurs d'onde).
- directionnelles (dépendant de la direction d'émission) ou hémisphériques (par intégration sur $\frac{1}{2}$ espace).

2.6.1. Luminance monochromatique et luminance totale

Considérons la Figure 28, dS_1 et dS_2 sont des éléments des surfaces respectives S_1 et S_2 de centre O_1 et O_2 et de normales n_1 et n_2 . $O_1O_2=r$ est la distance séparant dS_1 de dS_2 suivant la direction ω . θ_1 et θ_2 sont des angles entre la direction O_1O_2 et les normales respectives des surfaces S_1 et S_2 . $d\Omega_1$ est l'angle solide élémentaire sous lequel de O_1 on voit l'élément de surface dS_2 . L_1 et L_2 sont des luminances totales, elles seront définies par la suite.

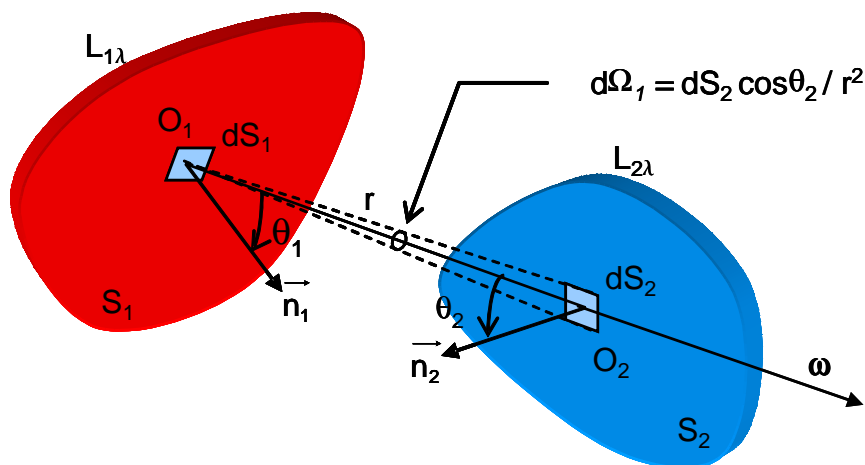


Figure 28 : Echange radiatif entre deux éléments de surface isothermes dS_1 et dS_2 de normales respectives n_1 et n_2 . $d\Omega_1$ est l'angle solide élémentaire de l'éléments dS_2 vu de dS_1 . r est la distance séparant les deux éléments. $L_{1\lambda}$ et $L_{2\lambda}$ sont les luminances spectrales

Le flux énergétique monochromatique radiant $d^3\Phi$ émis par la surface dS_1 en direction de dS_2 , dans la bande monochromatique $[\lambda ; \lambda+d\lambda]$, est donné par (51) :

$$d^3\Phi = L_{1\lambda} d\Omega_1 \cdot dS_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot d\lambda \quad (51)$$

où $L_{1\lambda}$ est la luminance spectrique de la surface dS_1 en $\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$; $d\Omega_1$ est l'angle solide (52) sous lequel est vu, de O_1 , la surface élémentaire dS_2 .

$$d\Omega_1 = \frac{dS_2 \cos\theta_2}{r^2} \quad (52)$$

De manière analogue, on définit la luminance monochromatique de la surface élémentaire dS_2 en direction de la surface dS_1 .

La luminance totale (en $W m^{-2}sr^{-1}$) dans la direction ω est définie par (53) :

$$L_1 = \int_0^{\infty} L_{1,\lambda} \cdot d\lambda \quad (53)$$

2.6.2. Emittance(ou Exitance) monochromatique et totale

- L'émittance monochromatique (en $W m^{-2}m^{-1}$) est définie par l'équation (54).

$$M_{1,\lambda} = \int_{\cap} L_{1,\lambda} \cdot \cos\theta_1 \cdot d\Omega_1 \quad (54)$$

- L'émittance totale (en $W m^{-2}$) est définie par l'équation (55).

$$M_1 = \int_0^{\infty} M_{1,\lambda} \cdot d\lambda \quad (55)$$

En général, M_1 dépend fortement de la température et de la nature du corps émetteur, c'est une fonction d'état.

2.7. Lois d'émission du rayonnement thermique

2.7.1. Loi de Lambert

L'émission d'une surface est diffuse (ou lambertienne) si la luminance est indépendante de la direction d'observation. On dit que la source émettrice obéit à la loi de Lambert (56).

$$M_{1,\lambda} = \int_{\cap} L_{1,\lambda} \cos\theta_1 d\Omega_1 = 2\pi L_{1,\lambda} \int_{\cap} \sin\theta_1 \cos\theta_1 \cdot d\theta_1 = \pi L_{1,\lambda} \quad (56)$$

où \cap désigne une hémisphère d'angle solide égale à 2π stéradian.

La démonstration étant identique, l'émittance totale et la luminance totale d'une surface S_1 diffuse sont reliées par la relation (57).

$$M_1 = \pi L_1 \quad (57)$$

2.7.2. Le corps noir

Le corps noir est le corps idéal qui absorbe intégralement le rayonnement électromagnétique incident, quelles que soient la longueur d'onde, la direction incidente et la polarisation. De part ses propriétés « idéales », il sert de référence dans le calcul des échanges radiatifs des corps réels.

Le corps noir est régi par un certain nombre de lois :

- Loi de Planck :

Elle donne l'expression de la luminance spectrique du corps noir (58).

$$L_{\lambda}^0 = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k_B\lambda T}\right) - 1} \quad (58)$$

où h est la constante de Planck ($h=6.626 \times 10^{-34}$ J s) ; $c = 2.996 \times 10^8$ m s⁻¹ est la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide ; $k_B=1.3805 \times 10^{-23}$ m² kg s⁻² K⁻¹ est la constante de Boltzmann, l'indice 0 représente le corps noir.

La Figure 29 montre l'évolution de la luminance spectrique à différentes températures, en fonction de la longueur d'onde.

La représentation logarithmique de la luminance spectrique montre des courbes ayant un maximum à une longueur d'onde donnée.

La luminance et l'émittance monomaniaques du corps noir obéissent à la loi de Lambert (59)

$$M_{\lambda}^0 = \pi L_{\lambda}^0 = \frac{2hc^2\lambda^{-5}\pi}{\exp\left(\frac{hc}{k_B\lambda T}\right) - 1} \quad (59)$$

- Approximation de la loi de Planck : Loi de Wien

La formule de Planck peut être approchée par une loi dite de Wien si le produit $\lambda T \ll 14000 \mu\text{m K}$ (λ = longueur d'onde en micromètre (μm) et T est la température en Kelvin (K) (60) :

$$M_{\lambda}^0 = 2h^2\lambda^{-5}\pi\exp\left(-\frac{hc}{k_B\lambda T}\right) \quad (60)$$

La loi de Wien permet de déterminer les coordonnées du maximum de la courbe de la l'émittance spectrique (61), (62) :

$$\lambda_m T = 2898 [\mu\text{m K}] \quad (61)$$

$$M_{\lambda}^0 = 1.287 \times 10^{-5} T^5 [\text{W m}^{-2}] \quad (62)$$

λ_m est la longueur d'onde pour laquelle la radiation émise par le corps noir est maximale à une température T donnée. La représentation de la loi de Wien correspond à la droite reliant les maximas des courbes de luminance (Figure 29).

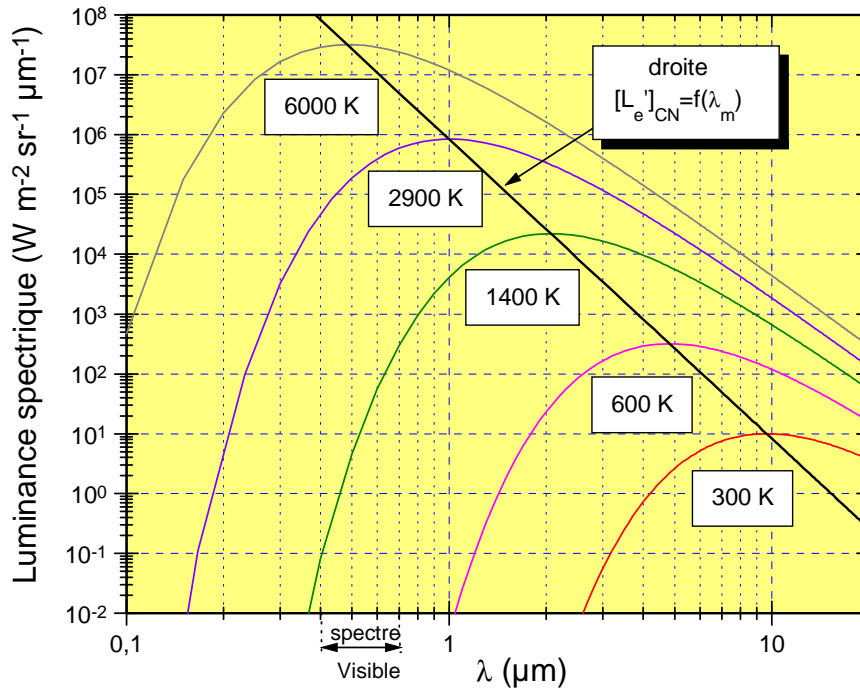


Figure 29 : Luminance spectrique du corps noir à différentes températures en fonction de la longueur d'onde

- Loi de Stefan–Boltzmann

La luminance totale du corps noir est obtenue par intégration sur toutes les longueurs d'onde de la luminance spectrique (63).

$$L^0 = \frac{M^0}{\pi} = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k_B\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (63)$$

où $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan Boltzmann.

2.8. Emissivité des corps réels

L'évaluation des propriétés émissives des corps réels se fait à partir de celles du corps noir placé dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde à l'aide d'un coefficient appelé *émissivité*.

L'émissivité d'un corps réel peut être spectrale ou totale et directionnelle ou hémisphérique.

On définit :

- $\epsilon_{\omega,\lambda} = \frac{L_{\omega,\lambda}}{L_{\lambda}^0}$; émissivité spectrale directionnelle dans une direction ω donnée.
- $\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda}^0}$; émissivité spectrale hémisphérique.

- $\varepsilon_{\omega} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\omega,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\lambda}^0 d\lambda} = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\omega,\lambda} L_{\lambda}^0 d\lambda$; émissivité totale directionnelle.
- $\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{\lambda}^0 d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda}^0 d\lambda$; émissivité totale hémisphérique.

L'émissivité des corps réels dépend de leur nature physico-chimique, de leur état de surface ; elle varie également avec la longueur d'onde, la direction d'émission et la température de surface du corps.

Quelques corps réels particulier :

- corps gris : l'émissivité est indépendante de la longueur d'onde.
- corps à émission diffuse (ou lambertienne) : l'émissivité est indépendante de la direction.
- corps gris et diffusant : l'émissivité est indépendante de la longueur d'onde et de la direction.

Dans la modélisation analytique des échanges de chaleur que nous avons menées plus loin, seule l'hypothèse de corps gris et diffusant est prise en compte.

2.9. Echange radiatif entre deux surfaces isothermes

2.9.1. Surfaces noires

Définissons d'abord la notion de facteur de forme qui est incontournable dans le calcul des échanges de chaleur par rayonnement.

Le facteur de forme ou facteur de vu noté F_{12} entre deux surfaces lambertiennes (diffuses) et isothermes S_1 et S_2 (Figure 28), est défini comme le ratio entre le flux thermique rayonné par S_1 et qui atteint S_2 sur le flux total rayonné par S_1 . C'est une grandeur sans dimension dont la valeur est comprise entre 0 et 1.

Le facteur de forme F_{12} a un caractère purement géométrique, il peut être calculé à partir de l'équation (64).

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{\pi r^2} \quad (64)$$

Dans le cas des surfaces S_1 et S_2 considérées comme étant des surfaces noires (Figure 28), le flux thermique émis par S_1 en direction de S_2 est donné par (65).

$$\Phi_{12} = M_1^0 \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{\pi r^2} = M_1^0 S_1 F_{12} \quad (65)$$

Le flux thermique émis par S_2 en direction de S_1 admet la même expression que (65) en intervertissant les indices 1 et 2.

Le flux thermique net Φ_R échangé entre les surfaces S_1 et S_2 est donné par (66).

$$\Phi_R = M_1^0 S_1 F_{12} - M_2^0 S_2 F_{21} = S_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (66)$$

T_1 et T_2 sont les températures respectives de S_1 et S_2 . La relation de réciprocité du facteur de forme implique : $S_1 F_{12} = S_2 F_{21}$.

2.9.2. Surfaces grises opaques et diffuses

Dans le cas des surfaces grises et diffusantes, non seulement le rayonnement est émis, mais aussi, le coefficient de réflexion de ces surfaces induit une réflexion du flux incident. Une grandeur noté J , appelée radiosité, permet d'établir le bilan d'énergie entre le flux émis en propre par la surface et le flux incident réfléchi par cette dernière.

L'expression de la radiosité hémisphérique est donnée par la relation(67).

$$J = \varepsilon M^0 + \rho E \quad (67)$$

ε est l'émissivité totale hémisphérique de la surface, ρ représente le facteur total de réflexion hémisphérique (réflectivité) et E est l'éclairement de la surface.

Le flux net échangé entre deux surfaces grises opaques et lambertiennes S_i et S_j , est calculé à partir de l'équation (68).

$$\Phi_R = S_i F_{ij} (J_i - J_j) \quad (68)$$

Où F_{ij} est le facteur de forme noir (i.e. le facteur de forme dans le cas des surfaces noires) de la surface S_i vers S_j et, J_i et J_j sont leurs radiosités respectives.

3. Modélisation des transferts de chaleur du nouveau calorimètre

Notre modèle analytique tient compte essentiellement de la conduction et du rayonnement thermique. Le dispositif étant sous vide, l'échange par convection thermique est appliqué uniquement sur les surfaces en contact avec le milieu extérieur au calorimètre.

3.1. Hypothèses attenantes au modèle

Afin de rendre compte d'éventuels gradients, le dispositif calorimétrique est découpé en deux grandes parties : une partie supérieure (S) et une partie inférieure (I) qui sont séparées au niveau de l'écran horizontal H (Figure 30).

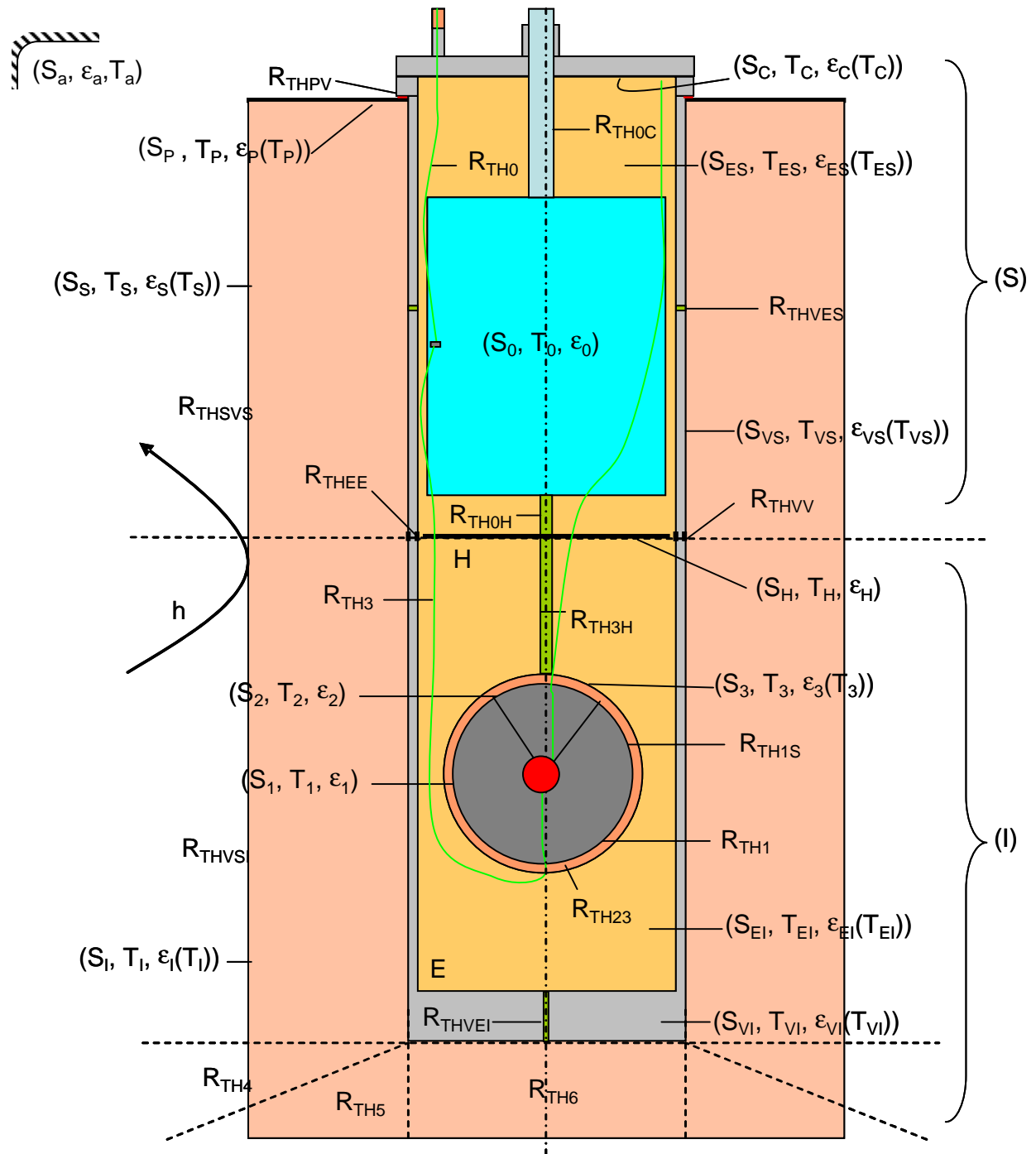


Figure 30 : Nomenclature des éléments pris en compte par la modélisation. Le calorimètre est découpé en deux grands ensembles I et S. Ces ensembles sont reliés par les résistances R_{THVV} et R_{THEE}

Pour les mêmes raisons que ci-dessus ces deux grandes parties sont elles mêmes subdivisées en plusieurs sous éléments dont les surfaces échangeant de la chaleur par rayonnement sont considérées comme des corps gris, isothermes et parfaitement diffusant (lambertiennes). Ces différents éléments sont indexés par leur surface S_i , leur émissivité totale hémisphérique ϵ_i et leur température T_i .

Dans la partie (I), le composant de température T_1 et de surface S_1 est supposé de géométrie sphérique avec un diamètre de 30mm, son émissivité est ϵ_1 .

Le support du composant et les amenées de courant constituent à l'intérieur de la cellule, des résistances thermiques de conduction notées respectivement R_{TH1S} et R_{TH1} .

La surface intérieure S_2 et extérieure S_3 de la cellule de mesure ont des émissivités notées respectivement ε_2 et ε_3 . Leurs températures respectives sont notées T_2 et T_3 . L'épaisseur de la cellule constitue une résistance thermique, elle est notée R_{TH23} .

Le support de la cellule et les amenées de courant arrivant sur la surface S_3 constituent des résistances thermiques qui sont respectivement notées par R_{TH3S} et R_{TH3} .

La surface S_H de l'écran horizontal H a une émissivité notée ε_H , sa température isotherme est notée T_H . Cet écran découple le rayonnement entre la partie inférieure et la partie supérieure du calorimètre.

La partie inférieure de l'écran E est notée EI, sa surface S_{EI} a une émissivité notée ε_{EI} . Cette partie de E est à une température T_{EI} et elle est séparée de la partie supérieure de E notée ES par une résistance thermique, notée R_{THEE} . Comme la partie inférieure EI, la partie ES est à une température T_{ES} , sa surface, notée S_{ES} a une émissivité notée ε_{ES} .

La partie inférieure de l'enceinte à vide est noté VI, elle est séparée de la partie supérieure VS par une résistance thermique notée R_{THVV} . Comme sur l'écran E, les surfaces, les émissivités et les températures de VI et VS sont nommées avec les indices respectifs VI et VS. Les contacts ES-VS et VI-EI définissent des résistances thermiques respectives R_{THVES} et R_{THVEI} .

On admet que le gradient vertical dans le Styrodur® est nul, ce qui revient à supposer que la résistance thermique entre la partie haute et la partie basse du Styrodur® est nulle. D'où l'absence de représentation (Figure 30) de résistance entre les parties (I) et (S) du Styrodur®.

La surface S_0 du réservoir d'azote est maintenu à une température fixe $T_0 = -196^\circ\text{C}$ (77K), son émissivité est notée ε_0 . Il est relié au couvercle de l'enceinte à vide C par un tube en inox, ce dernier constitue la résistance thermique R_{TH0C} . Les amenées de courant thermalisées sur sa surface et reliées au couvercle C constituent la résistance thermique R_{TH0} .

Le couvercle de l'enceinte à vide a une surface interne notée S_C , son émissivité est ε_C et sa température est T_C . Une résistance thermique notée R_{THCV} assure l'échange thermique par conduction entre le couvercle C et l'enceinte à vide.

A l'extérieur du calorimètre, la surface supérieure du film isolant à faible émissivité est notée S_S , son émissivité est ε_S et sa température est notée T_S . Cette partie est thermiquement reliée à l'enceinte à vide par l'intermédiaire d'une résistance thermique R_{THSVS} due à la présence du Styrodur®. La surface inférieure du calorimètre est notée S_I , son émissivité est ε_I et sa température est T_I , elle est thermiquement reliée à l'enceinte à vide par l'intermédiaire de quatre résistances dues au Styrodur® R_{THVSI} , R_{TH4} , R_{TH5} et R_{TH6} .

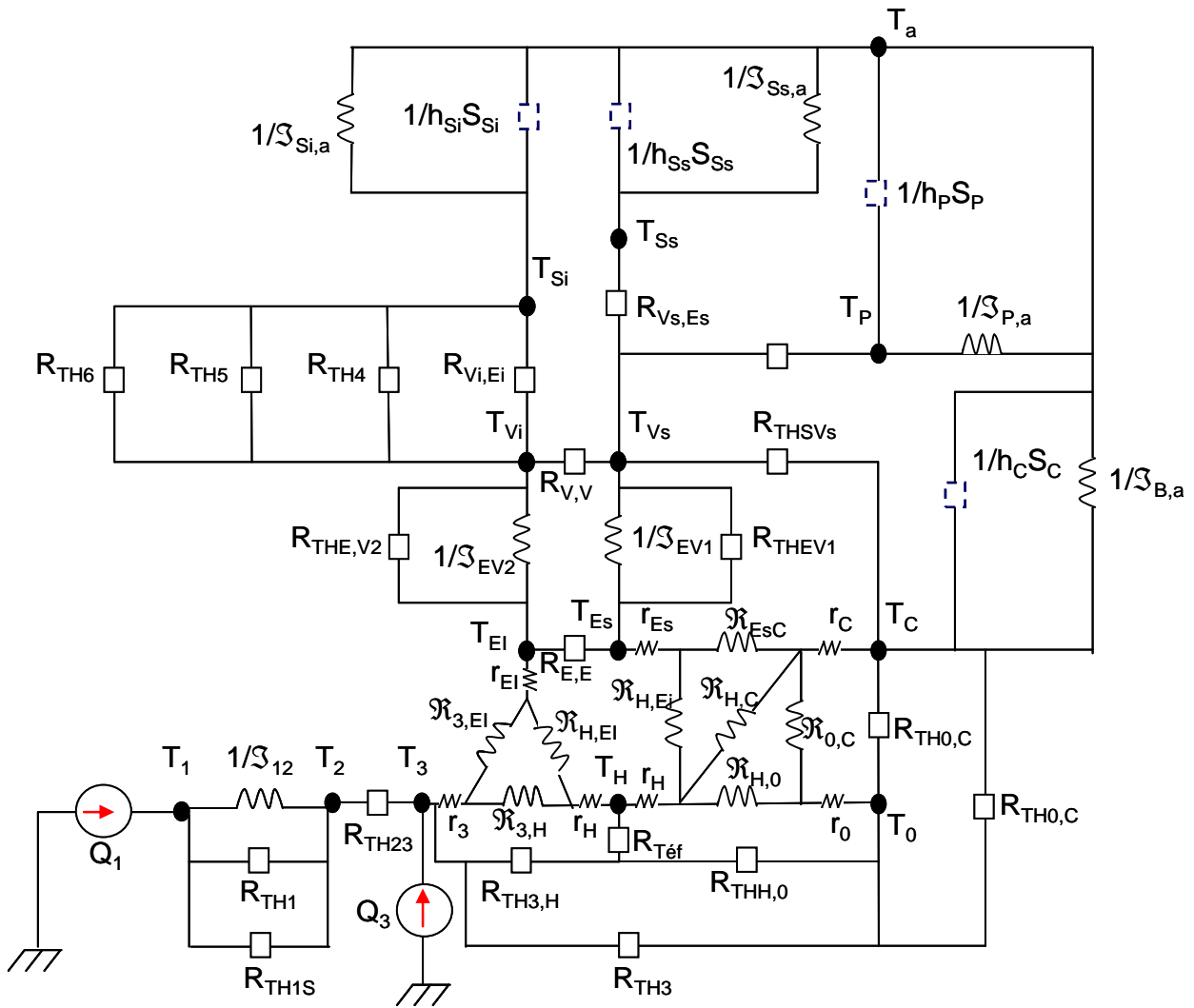
Le plateau qui recouvre la base supérieure du calorimètre a une surface notée S_P , elle a une émissivité ε_P et sa température est notée T_P . L'échange thermique

entre ce dernier et le Styrodur® est supposé nul. Cette plaque est mise en contact avec l'enceinte à vide par l'intermédiaire d'une résistance R_{THPV} .

Le modèle analytique réalisé est conçu pour étudier le calorimètre en régime thermique stationnaire. La géométrie extérieure du calorimètre est considérée comme cylindrique avec un diamètre de 0,6 m et une hauteur de 1,1 m.

Les propriétés des matériaux qui interviennent dans le modèle analytique sont fonction de la température. Ces propriétés correspondent essentiellement à la conductivité thermique des constituants et à l'émissivité totale hémisphérique des différentes surfaces rayonnantes du calorimètre.

Afin d'éclaircir les échanges de chaleurs entre les différents éléments, on se propose sur la Figure 31 de faire apparaître les relations, de différentes natures entre les éléments isothermes, sous la forme d'un graphe dont les arêtes sont représentées par des résistances (dont les dimensions diffèrent selon le mode d'échange).



- Résistance thermique de conduction notée $R_{THi,j} = L_{i,j}/(k.S)$ [$K W^{-1}$]
- ∞ Résistances au rayonnement notées $\mathfrak{R}_{i,j} = 1/S_i F_{i,j}$ et $1/S_{i,j} = (1-\epsilon_i)/S_i \epsilon_i + \mathfrak{R}_{i,j} + (1-\epsilon_j)/S_j \epsilon_j$ [m^{-2}]
- Résistance thermique à la convection noté $1/h_i S_i$ [$K W^{-1}$]
- ∞ Résistance surfacique au rayonnement notée $r_i = (1-\epsilon_i)/S_i \epsilon_i$ [m^{-2}]

Figure 31 : Représentation schématique des échanges de chaleur entre les différents éléments isothermes du calorimètre : T_i est la température de l'élément i , S_{ij} , \mathfrak{R}_{ij} et R_{ij} sont respectivement le facteur de forme gris, la résistance au rayonnement et la résistance de conduction entre les éléments i et j , r_i est la résistance de surface au rayonnement de S_i . Ces éléments seront définis clairement dans la partie : équations du modèle. Q_1 et Q_3 sont respectivement la puissance fournie par le composant lorsqu'il est actif et la puissance fournie par la régulation

3.2. Propriétés des matériaux utilisés dans le modèle

Seules sont décrites ici, les propriétés des matériaux intervenant dans notre modèle analytique des échanges de chaleurs dans le calorimètre. Ainsi, il sera principalement question de la conductivité thermique, de la chaleur massique, de la résistivité électrique et de l'émissivité des matériaux utilisés. L'émissivité n'est

spécifiée que pour les matériaux dont les surfaces interviennent dans le processus d'échange de chaleur par rayonnement.

3.2.1. Cuivre

Le cuivre utilisé dans la réalisation de notre cellule de mesure est du type OFHC (Oxygen Free-High Conductivity). C'est un cuivre affiné par voie électrolytique, refondu au four à induction et coulé sous atmosphère inerte. Sa composition est : au minimum 99,99% de Cu et au maximum 0,0005% d'O₂ [OERN2002]. Ces caractéristiques thermiques en fonction de la température sont les suivantes [Simon1992] :

- Conductivité thermique entre 4K et 300K (69) :

$$\log_{10}k_{Cu}(T) = \frac{a + cT^{0.5} + eT + gT^{1.5} + iT^2}{1 + bT^{0.5} + dT + fT^{1.5} + hT^2} \quad (69)$$

- Chaleur spécifique entre 4K et 300K (70) :

$$\log_{10}C = a + b(\log_{10}T) + c(\log_{10}T)^2 + d(\log_{10}T)^3 + e(\log_{10}T)^4 + f(\log_{10}T)^5 + g(\log_{10}T)^6 + h(\log_{10}T)^7 + i(\log_{10}T)^8 \quad (70)$$

Les constantes $\alpha - i$ de la conductivité thermique dépendent du rapport de résistivité résiduel (RRR). Dans notre cas, RRR est considéré comme étant égal à 150.

Le Tableau 6 donne les constantes $\alpha-i$ de la conductivité thermique avec un RRR égale à 150 et celles de la chaleur spécifique du cuivre OFHC.

Constantes	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Chaleur spécifique [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
a	2,3797	-1,91844
b	-0,47461	-0,15973
c	-0,88068	8,61013
d	0,13871	-18,996
e	0,29505	21,9661
f	-0,02043	-12,7328
g	-0,04831	3,54322
h	0,001281	-0,3797
i	0,003207	0

Tableau 6 : Constantes de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du cuivre dans le ca où RRR=150 et 4 K<T<300 K

Pour des températures supérieures à 300 K, nous avons continué à utiliser l'équation (69) bien que cette dernière ne soit pas définie pour cette plage de température. En effet, on pouvait également utiliser la loi de Wiedemann-Franz [Degallaix2007] pour le cuivre qui relie la conductivité thermique à la résistivité électrique du matériau (71).

$$\frac{\rho_C \cdot K_C}{T} = L \quad (71)$$

où ρ_C est la résistivité électrique du cuivre ($\rho_C = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ à 293 K), K_C sa conductivité thermique ($K_C = 392 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 293 K) et L une constante ($L = 2,4 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ W K}^{-2}$). Le coefficient de température de résistivité du cuivre entre 273 K et 373 K est de $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (voir centre d'information du cuivre, laitons et alliages).

Cependant et comme on peut l'observer sur la Figure 32, cette loi de Wiedmann-Franz conduit à un décalage brutal de la conductivité thermique à 300 K avec l'équation (69). Ainsi nous travaillons dans le pire des cas (conductivité thermique faible par rapport à celle donnée par la loi de Wiedmann-Franz).

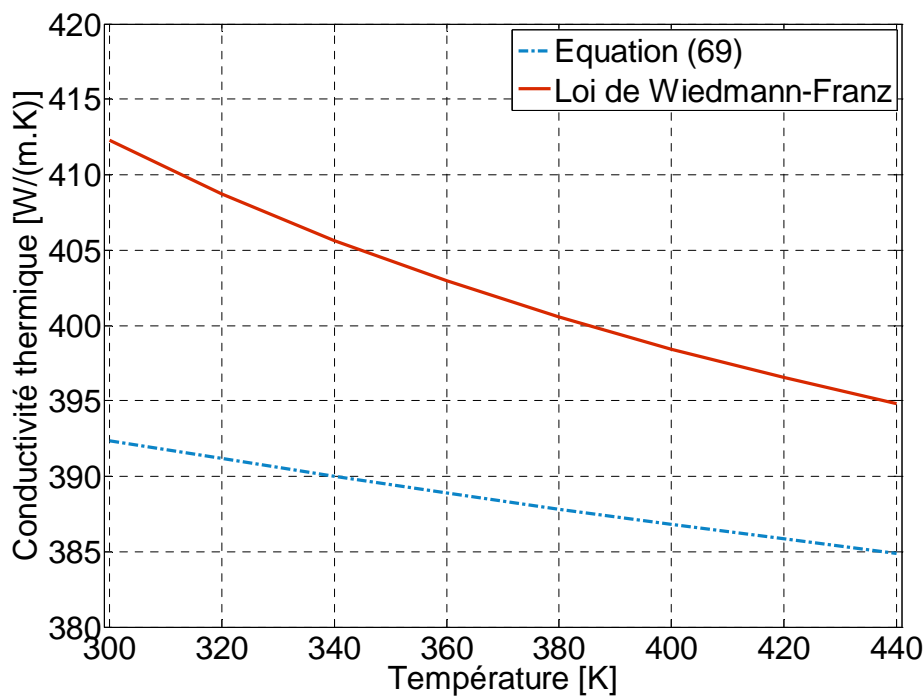


Figure 32 : Comparaison de l'équation (69) à la loi de Wiedmann-Franz dans le cas du Cuivre

3.2.2. Constantan

Dans notre modèle analytique des échanges de chaleur dans le calorimètre, nous avons préféré une approximation de la conductivité thermique par linéarisation des données de Bertil Sundqvist [Sundqvist1992] (72).

$$k_C = 19.5 [1 + 1.907 \times 10^{-3} (T - 200)] \quad (72)$$

La Figure 33 est une comparaison de (72) avec les données de Bertil Sundqvist. Les points de l'équation (72) restent au dessus de la courbe des données de Sundqvist, cette caractéristique permet de majorer la conductivité thermique du constantan. Ainsi dans notre modèle, cette équation nous permet de travailler dans le pire des cas, puisque les fuites par conduction à travers les fils de constantan sont majorées.

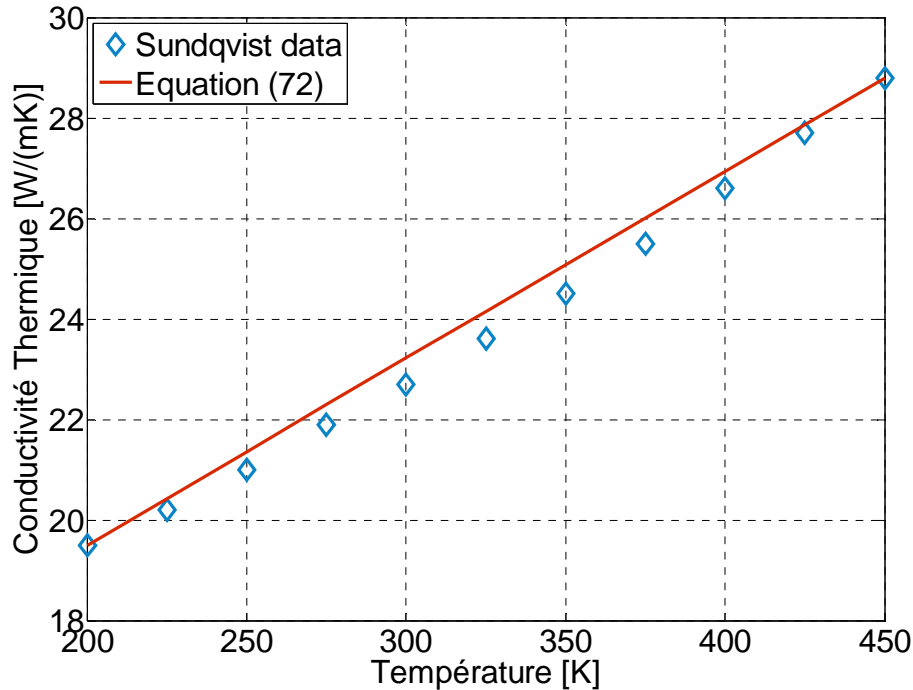


Figure 33 : Comparaison de l'équation (72) aux données de Sundqvist dans le cas du Constantan

Pour le cas de la résistivité électrique, les mesures effectuées par Bertil Sundqvist montrent que la résistivité moyenne du constantan est de $47,8 \mu\Omega \text{ cm}$ à 22°C , elle est quasiment indépendante de la température.

3.2.3. Or

Dans le calorimètre, l'usage de l'or est purement surfacique. On l'utilise pour limiter le rayonnement et pour protéger les surfaces contre l'oxydation. Dans le cas des échanges de chaleur par rayonnement, nous nous sommes intéressés à son émissivité. La théorie de Sievers [Sievers1980] permet de calculer les émissivités des métaux purs à partir des équations (73) et (74).

$$\varepsilon_N = \frac{2,49 \cdot 10^{-8}}{|R_H|^{1/2}} \rho_\mu + \frac{3,55 \cdot 10^{-6}}{|R_H|^{1/3}} \quad (73)$$

$$\varepsilon = \frac{4}{3} \varepsilon_N \quad (74)$$

où ε_N et ε sont respectivement l'émissivité totale normale et hémisphérique du métal, R_H est sa constante de Hall et ρ_μ sa résistivité électrique exprimée en $\mu\Omega \text{ cm}$. L'erreur de ces équations est inférieure à 1 % par rapport au calcul numérique, pour $\rho_\mu < 10 \mu\Omega \text{ cm}$.

La résistivité électrique de l'or à 20°C est de $2,44 \mu\Omega \text{ cm}$ [Cutnell1998] [Lloyd1998]. La résistivité de l'or en fonction de la température peut être calculée à partir de l'équation (75).

$$\rho_{Au}(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (75)$$

où ρ_0 est la résistivité de l'or à $T_0 = 293$ K et α représente le coefficient de résistivité en K^{-1} . Ce dernier est obtenu par linéarisation des données de Glenn Elert [Elert2004] entre 100 K et 600 K, soit $\alpha = 3,78 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

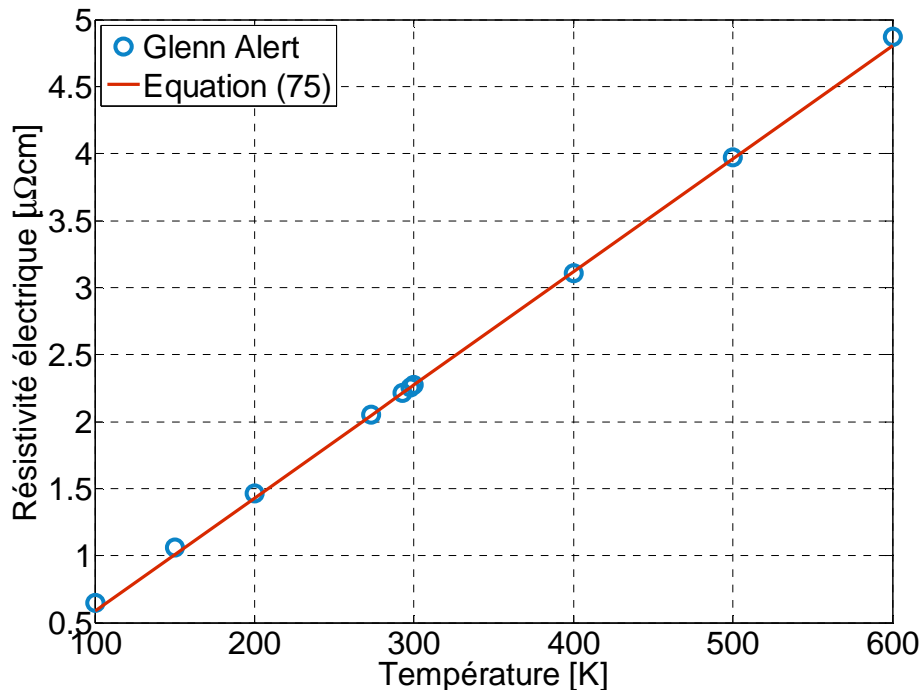


Figure 34 : Comparaison de l'équation (75) avec les données de Glenn Elert dans le cas de l'Or

La Figure 34 montre la comparaison des valeurs données par l'équation (75) avec les données obtenues par Glenn Elert [Elert2004].

On observe un écart absolu entre les deux courbes allant de 9 à 2.2 % entre 100 K et 200 K. Entre 200 K et 500 K, les deux courbes sont quasiment confondues et l'écart moyen est inférieur à 1 %. Au-delà de 500 K, l'écart remonte pour atteindre une valeur de 1,3 % à 600 K.

Les calculs analytiques des échanges thermiques dans le calorimètre ont été effectués dans la plage de température allant de 200 K à 450 K, c'est-à-dire dans la gamme de mesure envisagée pour notre calorimètre. L'écart entre l'équation (75) et les données de Glenn est donc inférieur à 1 %.

Cette équation a donc été employée dans le calcul de l'émissivité de l'or en fonction de la température.

Dans le modèle des électrons libres utilisé par Sievers [Sievers1980], la constante de Hall R_H est donnée par (76) [Ashcroft2003] [Boeckle2006].

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (76)$$

où n est la densité de porteur de charge du métal ($n = 5,90 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ pour l'or), e est la charge électronique ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

3.2.4. Acier inoxydable

L'acier inoxydable utilisé dans notre calorimètre est de type 304L. Sa conductivité thermique en fonction de la température dans l'intervalle 4-300 K est donnée par l'équation (77) [Touloukian1976].

$$\log k_{in}(T) = a + b(\log T) + c(\log T)^2 + d(\log T)^3 + e(\log T)^4 + f(\log T)^5 + g(\log T)^6 + h(\log T)^7 + i(\log T)^8 \quad (77)$$

Les coefficients a - i sont donnés dans le Tableau 7. Notons que la relation (77) conduit à une erreur de 2% par rapport aux conditions expérimentales.

Coefficients	Conductivité thermique [$W m^{-1}K^{-1}$]
a	-1,4087
b	1,3982
c	0,2543
d	-0,6260
e	0,2334
f	0,4256
g	-0,4658
h	0,1650
i	-0,0199

Tableau 7 : Coefficients relatif à l'équation (77) permettant de calculer la conductivité thermique de l'acier SS 304L

Dans la gamme de température allant de 300 K à 600 K, la conductivité thermique est donnée par l'expression de Graves et al. [Graves1991] (78).

$$k_{in}(T) = 7,9318 + 0,023051T + 6,4166 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (78)$$

où k est la conductivité thermique de l'acier 304L en $W m^{-1}K^{-1}$ et T est la température en Kelvin (K).

La résistivité électrique de notre acier en fonction de la température est donnée par l'équation (79), qui est obtenue par linéarisation des données de Roger [Roger1979].

$$\rho_{in}(T) = \rho_{in0} [1 - \alpha_{in}(T_0 - T)] \quad (79)$$

où ρ_{in} ($\rho_{in0} = 77,41 \cdot 10^{-6} \Omega cm$) est la résistivité électrique de l'acier à $T_0 = 340 K$ et α_{in} ($\alpha_{in} = 9,8906 \cdot 10^{-4} K^{-1}$) est son coefficient de résistivité.

Dans le cas des échanges thermiques par rayonnement, l'émissivité totale hémisphérique de l'acier 304L peut être calculée à partir de la théorie classique d'émission développée par Davisson & Weeks (80) [Davisson1924] [Roger1979].

$$\epsilon_{in} = 0,754(\rho_{in} \cdot T)^{1/2} - 0,632(\rho_{in} \cdot T) + 0,670(\rho_{in} \cdot T)^{3/2} - 0,607(\rho_{in} \cdot T)^2 \quad (80)$$

ϵ_{in} est l'émissivité totale hémisphérique de l'acier, ρ_{in} est sa résistivité en Ωcm et T est sa température en K. Cette expression a une précision de 1 % si le produit $\rho_{in} \times T$

est inférieur à $0,1 \Omega \text{ cm K}$, ce qui est le cas de notre matériau dans la gamme de température allant de 100 K à 500 K.

La Figure 35 montre une comparaison entre les mesures d'émissivité de l'acier 304L effectuées par Roger et al [Roger1979] et la théorie de Davisson & Weeks.

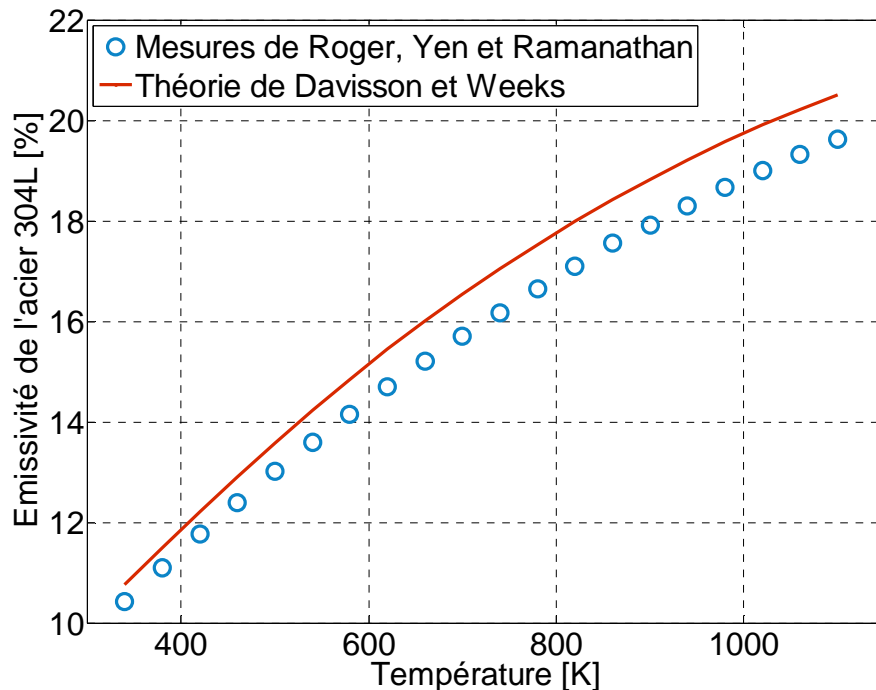


Figure 35 : Comparaison entre les données d'émissivité mesurées par Roger et al. avec la courbe obtenue par la théorie de Davisson et Weeks

Le graphe donné par la théorie de Davisson & Weeks (courbe avec carrés, Figure 35) reste légèrement au dessus des données mesurées par Roger et al. La théorie de Davisson conduit à surestimer la valeur de l'émissivité de l'acier 304L, ce qui nous permet de travailler, là encore, dans le pire des cas.

3.2.5. Epoxy fibre de verre

La conductivité thermique k_S de l'époxy fibre de verre utilisé dans le calorimètre obéit à l'équation (77) [Marquardt2000] [Hust1984] [Child1973].

Les coefficients $\alpha - i$ correspondant sont donnés dans le Tableau 8. Notons que la relation (77) conduit à une erreur de 5% par rapport aux conditions expérimentales.

Coefficients	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]
a	-2,64827
b	8,80228
c	-24,8998
d	41,1625
e	-39,8754
f	23,1778
g	-7,95635
h	1,48806
i	-0,11701

Tableau 8 : Coefficients relatif à l'équation (77) permettant de calculer la conductivité thermique de l'époxy fibre de verre

3.2.6. Styrodur®

Le Styrodur® a une conductivité thermique de 0,034W m⁻¹K⁻¹. Dans notre modèle analytique, cette grandeur est considérée comme étant constante et indépendante de la température.

3.3. Expression des facteurs de forme noirs intervenant dans le modèle

Le facteur de forme dans le cas des surfaces à émission diffuse est défini comme étant le ratio entre le flux radiatif émis par une surface S_i qui atteint la surface S_j, sur le flux total émis par S_i. Les surfaces du calorimètre étant considérées comme parfaitement diffusantes, nous donnons dans ce cas les différents facteurs de forme.

3.3.1. Facteurs de forme S₀-S_{ES}, S₀-S_H et S_H-S_{ES}.

Le facteur de forme F_{0,H} entre les surfaces S₀ et S_H (i.e. réservoir d'azote et écran horizontal, voir Figure 36) est égale à la somme des facteurs de forme F_{01,H} plus F_{02,H}. D'abord, on calcule le facteur de forme F_{01,H} entre S₀₁ et S_H qui est donné par (81) [Feingold1978].

$$F_{01,H} = \frac{1}{2} \left\{ X - \left[X^2 - 4 \left(\frac{R_H}{R_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (81)$$

où R_H = r / a_H, R₀ = r₀ / a_H et X = 1+(1+R_H²)/R₀².

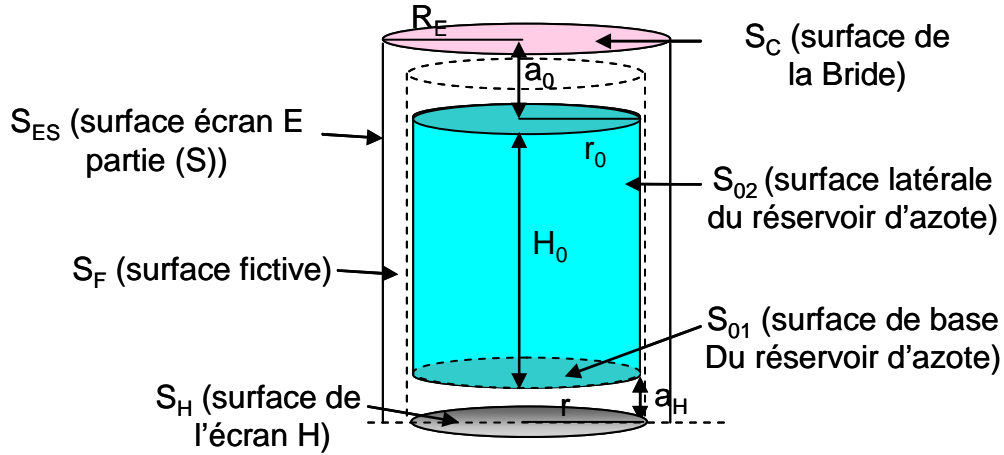


Figure 36 : Représentation des surfaces en regards intervenant dans le calcul des facteurs de forme relatif au réservoir d'azote

Soit $F_{02,F}$ le facteur de forme de S_{02} vers la surface fictive S_F (Figure 36). L'expression de Samuel Rea [Rea1975] donnée par (82) permet de calculer ce facteur.

$$F_{02,F} = 1 + 2 \left(\frac{X}{L} F_X - \frac{X+L}{L} F_{X+L} \right) \quad (82)$$

Avec $X = a_H / r$; $L = H_0 / r$.

Soit $R = r_0 / r$ et $\xi = X$ ou $X + L$, les fonctions F_ξ sont définies par (83).

$$F_\xi = \frac{B_\xi}{8R\xi} + \frac{1}{2\pi} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{A_\xi}{B_\xi} \right) - \frac{1}{2\xi} \left[\frac{(A_\xi + 2)^2}{R^2} - 4 \right]^{\frac{1}{2}} \cos^{-1} \left(\frac{A_\xi R}{B_\xi} \right) - \frac{A_\xi}{2\xi R} \sin^{-1} R \right\} \quad (83)$$

où $A_\xi = \xi^2 + R^2 - 1$ et $B_\xi = \xi^2 - R^2 + 1$.

Ainsi, le facteur de forme $F_{0,H}$ de S_0 vers S_H est donné par l'équation (84).

$$F_{0,H} = \frac{1}{2} (1 - F_{02,F}) + F_{01,H} \quad (84)$$

Le calcul du facteur de forme $F_{0,C}$ de S_0 vers S_C (réservoir d'azote vers bride supérieure de l'enceinte à vide) est effectué de la même manière que celui de $F_{0,H}$. Cependant il faut remplacer r par R_E (rayon de l'enceinte à vide) et a_H par a_0 (plus petite distance séparant les deux surfaces).

Le facteur de forme $F_{0,ES}$ entre S_0 et S_{ES} (Figure 30) est déduit des deux facteurs de forme précédemment calculés par (85).

$$F_{0,ES} = 1 - F_{0,H} - F_{0,C} \quad (85)$$

Le facteur de forme entre S_H et S_C est considéré comme nul dans notre modèle parce que ces deux surfaces sont écrantées par le réservoir d'azote.

Compte tenu de la faible distance entre les surfaces S_{ES} et S_{VS} d'une part et S_{EI} et S_{VI} d'autre part, les facteurs de forme $F_{ES,VS}$ et $F_{EI,VI}$ sont égaux à l'unité. Les facteurs de forme $F_{ES,VI}$ et $F_{EI,VS}$ sont par conséquent nuls.

3.3.2. Facteurs de forme S_3 - S_H , S_3 - S_{EI} et S_H - S_{EI} .

Le facteur de forme de S_3 vers S_H est calculé à partir de la Figure 37 [Feingold1970] [Naraghi1982] et est donné par l'équation (86).

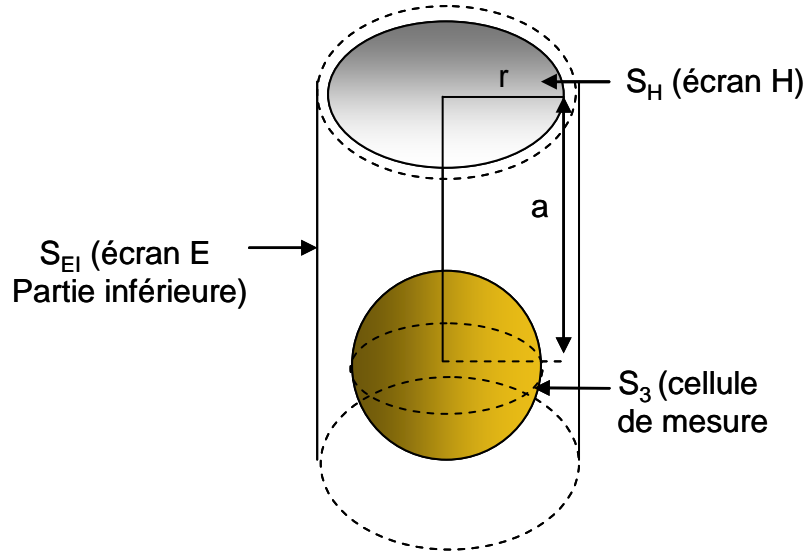


Figure 37 : Représentation des surfaces en regards intervenant dans le calcul des facteurs de forme, relatif à la cellule de mesure ($a = 0,28$ m et $r = 0,125$ m)

$$F_{3,H} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(1 + R^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (86)$$

où R est égal au ratio r/a .

Le facteur de forme F_{3EI} entre S_3 et S_{EI} , et le facteur de forme F_{HEI} entre S_H et S_{EI} sont déduits respectivement par les relations (87) et (88).

$$F_{3,EI} = 1 - F_{3,H} \quad (87)$$

$$F_{H,EI} = 1 - F_{3,H} \times \frac{S_3}{S_H} \quad (88)$$

Les facteurs de formes $F_{1,2}$ entre le composant et la surface interne de la cellule est égale à l'unité. Les facteurs de formes $F_{S_I,a}$, $F_{S_S,a}$ et $F_{C,a}$ des surfaces respectives S_I , S_S et S_C vers le milieu ambiant considéré comme une surface fermée autour du calorimètre sont également égaux à 1. Les équations du modèle thermique feront usages de ces facteurs de forme pour exprimer les échanges par rayonnement.

3.4. Equations du modèle thermique

Les équations établissant le bilan de puissance du modèle analytique tiennent compte des trois modes d'échange de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection. Ce dernier mode d'échange est pris en compte uniquement à l'extérieur du calorimètre, l'intérieur du dispositif étant sous vide. Toutes les équations sont déterminées en régime thermique stationnaire.

3.4.1. Bilan thermique au composant électrique

Le bilan de puissance appliqué au composant conduit à l'équation (89).

$$\mathfrak{S}_{1,2}\sigma(T_1^4 - T_2^4) + (T_1 - T_2) \times \left(\frac{1}{R_{TH1}} + \frac{1}{R_{TH1S}} \right) - Q_1 = 0 \quad (89)$$

où $\mathfrak{S}_{12} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 S_1} + \frac{1}{F_{1,2} S_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 S_2}$ représente le facteur de forme gris de S_1 vers S_2 .

L'émissivité ε_1 est considérée comme étant indépendante de la température, elle varie entre 0.1 et 0.9. L'émissivité ε_2 de S_2 ($\varepsilon_2 = 0.97$) est celle de la peinture Nextel Velvet Coating 811-21®. Le paramètre σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Les résistances thermiques R_{TH1} et R_{TH1S} sont calculées à partir des équations (90) et (91).

$$R_{TH1} = \frac{l_1}{2 \times k_C(T_{12}) \times A_1} \quad (90)$$

l_1 ($l_1 = 110 \text{ mm}$) est la longueur d'une amenée de courant à l'intérieur de la cellule, A_1 ($A_1 = 0.785 \text{ mm}^2$) est sa section et $k_C(T)$ est la conductivité thermique du constantan. T_{12} est la demi-somme des températures T_1 et T_2 .

$$R_{TH1S} = \frac{l_{1S}}{2 \times k_C(T_{12}) \times A_{1S}} + \frac{l_{SA}}{k_S(T_1) \times A_{SA}} \quad (91)$$

l_{1S} ($l_{1S} = 7,7.10^{-2} \text{ m}$) et l_{SA} ($l_{SA} = 3.10^{-3} \text{ m}$) sont respectivement la longueur du support du composant de section A_{1S} ($A_{1S} = 1,96.10^{-7} \text{ m}^2$) et la longueur du système d'accrochage de section A_{SA} ($A_{SA} = 2.10^{-6} \text{ m}^2$) et de conductivité thermique k_S .

Q_1 est la puissance générée dans le composant lorsqu'il est alimenté électriquement.

3.4.2. Cellule de mesure

Le bilan de puissance entre la surface interne et la surface externe de la cellule de mesure (Figure 31) est donné par l'équation (92).

$$Q_1 + \frac{T_2 - T_3}{R_{TH23}} = 0 \quad (92)$$

R_{TH23} est donnée par l'équation (93)

$$R_{TH23} = \frac{1}{2\pi k_{Cu}(T_3)} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \right) \quad (93)$$

L'équation (94) est obtenue en appliquant le bilan de puissance sur la cellule de mesure.

$$Q_1 + Q_3 + \frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,EI}} + \frac{\sigma(T_H^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,H}} + (T_0 - T_3) \times \left(\frac{2}{R_{TH3}} + \frac{1}{R_{TH3S}} \right) = 0 \quad (94)$$

Q_3 est la puissance générée par la régulation de température de la cellule de mesure. T_0 est égale à la température de l'azote liquide ($T_0 = 77 \text{ K}$). $\mathfrak{R}_{3,EI}$ et $\mathfrak{R}_{3,H}$ sont

des résistances radiatives équivalentes entre la cellule de mesure d'une part et les écrans E et H d'autre part (Figure 38), calculées à partir des transformations de Kennelly.

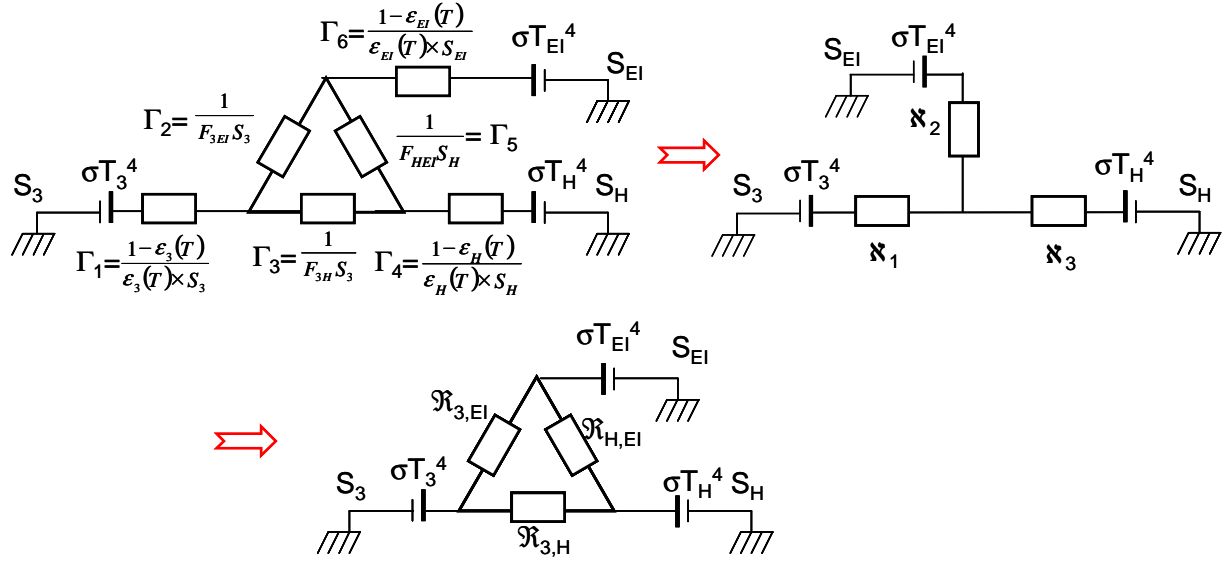


Figure 38 : Schéma électrique équivalent représentant les échanges radiatifs entre les surfaces grises S_3 , S_{EI} et S_H

Les émissivités ε_{EI} et ε_3 sont calculées à partir de l'équation (74). Les expressions des résistances thermiques \mathfrak{R}_i en fonction des Γ_i sont données par les équations (95), (96) et (97).

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{\Gamma_2 \Gamma_3}{\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_5} + \Gamma_1 \quad (95)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{\Gamma_2 \Gamma_5}{\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_5} + \Gamma_6 \quad (96)$$

$$\mathfrak{R}_3 = \frac{\Gamma_3 \Gamma_5}{\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_5} + \Gamma_4 \quad (97)$$

Les expressions des résistances thermiques $\mathfrak{R}_{i,j}$ en fonction des \mathfrak{R}_i sont données par les équations (98), (99) et (100).

$$\mathfrak{R}_{3,EI} = \frac{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_3 + \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_3} \quad (98)$$

$$\mathfrak{R}_{3,H} = \frac{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_3 + \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_2} \quad (99)$$

$$\mathfrak{R}_{H,EI} = \frac{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_3 + \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_1} \quad (100)$$

Les résistances thermiques de conduction R_{TH3} et R_{TH3S} sont calculées à partir des équations (101) et (102).

$$R_{TH3} = \frac{l_3}{2 \times k_{Cu}(T_{3,0}) \times A_1} \quad (101)$$

l_3 ($l_3 = 0,63$ m) est la longueur des amenées de courants entre le point de thermalisation situé au réservoir d'azote liquide et la cellule de mesure. k_{Cu} et $T_{3,0}$ sont respectivement la conductivité thermique des amenées de courant et la demi-somme de T_3 et T_0 .

$$R_{TH3S} = \frac{l_{3S}}{k_S(T_{3,0}) \times A_{3S}} \quad (102)$$

l_{3S} ($l_{3S} = 0,18$ m) est la longueur du support de la cellule, de section A_{3S} ($A_{3S} = 6,28 \cdot 10^{-5}$ m²).

3.4.3. Ecran E

Les bilans de puissance sont effectués dans la partie inférieure et la partie supérieure de l'écran E.

i. Partie inférieure

Le bilan de puissance appliqué sur la partie inférieure de l'écran E permet d'écrire l'équation (103).

$$\frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,EI}} + \frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_H^4)}{\mathfrak{R}_{H,EI}} + \mathfrak{S}_{EI,VI} \sigma(T_{EI}^4 - T_{VI}^4) + \frac{T_{EI} - T_{VI}}{R_{THEI,VI}} + \frac{T_{EI} - T_{ES}}{R_{THE,E}} = 0 \quad (103)$$

$$\text{où } \mathfrak{S}_{EI,VI} = \frac{1 - \varepsilon_{EI}(T_{EI})}{\varepsilon_{EI}(T_{EI}) \times S_{EI}} + \frac{1}{S_{EI}} + \frac{1 - \varepsilon_{VI}(T_{VI})}{\varepsilon_{VI}(T_{VI}) \times S_{VI}}.$$

$\varepsilon_{EI}(T_{EI})$ et $\varepsilon_{VI}(T_{VI})$ sont calculées à partir des équations (74) et (80) et $R_{H,EI}$ est la résistance au rayonnement définie sur la Figure 38.

La résistance thermique de conduction $R_{THEI,VI}$ est donnée par l'équation (104).

$$R_{THEI,VI} = \frac{l_{E,VI}}{k_S(T_{E,VI}) \times A_{E,VI}} \quad (104)$$

$l_{E,VI}$ est la longueur de la tige en époxy fibre de verre supportant l'écran vertical E ($l_{E,VI} = 5 \cdot 10^{-2}$ m), $A_{E,VI}$ est sa section, elle est égale à $1,96 \cdot 10^{-5}$ m². $T_{E,VI}$ est la demi-somme des températures T_{EI} et T_{VI} .

La résistance thermique de conduction $R_{THE,E}$ est un cylindre en cuivre de rayon intérieure égale à 129 mm, d'épaisseur 1 mm et de hauteur $l_{E,E}$ égale à 10 mm.

$$R_{THE,E} = \frac{l_{E,E}}{k_{Cu}(T_{E,E}) \times A_{E,E}} \quad (105)$$

La section $A_{E,E}$ de la résistance thermique $R_{THE,E}$ est de $2,03 \cdot 10^{-4}$ m² et $T_{E,E}$ est la demi-somme de T_{EI} et T_{ES} .

ii. Partie supérieure

Dans la partie supérieure contenant le réservoir d'azote, les échanges radiatifs sont effectués entre quatre surfaces S_{ES} , S_H , S_C et S_0 (Figure 36). La Figure 39 donne l'analogie électrique des échanges radiatifs entre ces surfaces.

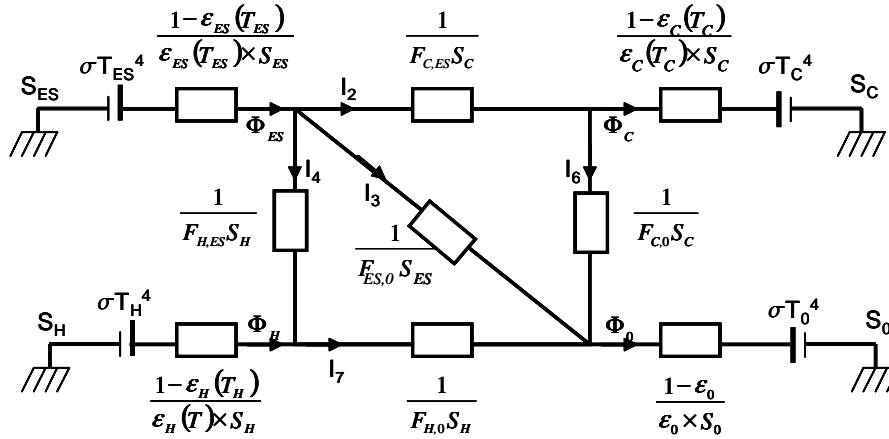


Figure 39 : Schéma électrique équivalent représentant les échanges radiatifs entre les surfaces grises S_{ES} , S_C , S_0 et S_H

Les flux thermiques nets échangés par les surfaces S_{ES} , S_H , S_C et S_0 sont respectivement notés par Φ_{ES} , Φ_H , Φ_C et Φ_0 . Les flux I_2 , I_3 , I_4 , I_6 et I_8 sont échangés respectivement entre les surfaces S_{ES} - S_C , S_{ES} - S_0 , S_{ES} - S_H , S_C - S_0 et S_H - S_0 .

Les échanges radiatifs de la Figure 39 obéissent à l'équation matricielle (106)

$$MX = A \quad (106)$$

La matrice M est donnée par (107) :

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_H & -\mathcal{R}_{H,0} & -r_0 \\ -r_{ES} & 0 & 0 & -\mathcal{R}_{H,ES} & 0 & 0 & -r_H & 0 & 0 \\ -r_{ES} & \mathcal{R}_{C,ES} & 0 & 0 & -r_C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{ES} & 0 & \mathcal{R}_{ES,0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_C & \mathcal{R}_{C,0} & 0 & 0 & -r_0 \end{pmatrix} \quad (107)$$

avec :

$$r_H = \frac{1 - \varepsilon_H(T_H)}{\varepsilon_H(T_H) \times S_H} ; r_{ES} = \frac{1 - \varepsilon_{ES}(T_{ES})}{\varepsilon_{ES}(T_{ES}) \times S_{ES}} ; r_0 = \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0 \times S_0} ; r_C = \frac{1 - \varepsilon_C(T_C)}{\varepsilon_C(T_C) \times S_C} ; \mathfrak{R}_{H,0} = \frac{1}{F_{H,0} S_H} ;$$

$$\mathfrak{R}_{H,ES} = \frac{1}{F_{H,ES} S_H} ; \mathfrak{R}_{C,ES} = \frac{1}{F_{C,ES} S_C} ; \mathfrak{R}_{C,0} = \frac{1}{F_{C,0} S_C} .$$

Les émissivités ε_{ES} et ε_C sont respectivement calculées à partir des équations (74) et (80). L'émissivité ε_H varie entre 0,03 et 0,4, et ε_0 est fixée à 0,069. Les surfaces S_H , S_{ES} , S_0 et S_C (Figure 30) sont respectivement égales à $4,9.10^{-2} \text{ m}^2$, $0,38 \text{ m}^2$, $0,317 \text{ m}^2$ et $6,15.10^{-2} \text{ m}^2$.

Les matrices X et A sont données respectivement par les équations (108) et (109).

$$X = \begin{pmatrix} \Phi_{ES} \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \Phi_C \\ I_6 \\ \Phi_H \\ I_8 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} \quad (108), \text{ et } A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma(T_H^4 - T_0^4) \\ \sigma(T_H^4 - T_{ES}^4) \\ \sigma(T_{ES}^4 - T_C^4) \\ \sigma(T_{ES}^4 - T_0^4) \\ \sigma(T_C^4 - T_0^4) \end{pmatrix} \quad (109)$$

L'expression des puissances radiatives Φ_H , Φ_{ES} , Φ_C et Φ_0 est déterminée par inversion de la matrice M.

Sur la partie supérieure de l'écran E, le bilan des puissances permet d'écrire l'équation (110) :

$$\Phi_{ES} + \mathfrak{S}_{ES,VS} \sigma(T_{ES}^4 - T_{VS}^4) + \frac{T_{ES} - T_{VS}}{R_{THES,VS}} + \frac{T_{ES} - T_{EI}}{R_{THE,E}} = 0 \quad (110)$$

avec $\mathfrak{S}_{ES,VS} = \frac{1 - \varepsilon_{ES}(T_{ES})}{\varepsilon_{ES}(T_{ES}) \times S_{ES}} + \frac{1}{S_{ES}} + \frac{1 - \varepsilon_{VS}(T_{VS})}{\varepsilon_{VS}(T_{VS}) \times S_{VS}}$, Φ_{ES} est solution de l'équation (106)

$R_{THES,VS}$ est donnée par l'équation (111).

$$R_{THES,VS} = \frac{l_{ES,VS}}{3k_S(T_{ES,VS}) \times A_{ES,VS}} \quad (111)$$

$l_{ES,VS}$ ($l_{ES,VS} = 10^{-2} \text{ m}$) est la longueur d'une tige constituant $R_{THES,VS}$, $A_{ES,VS}$ ($A_{ES,VS} = 7,85.10^{-5} \text{ m}^2$) est sa section et $T_{ES,VS}$ est la demi-somme des températures T_{ES} et T_{VS} .

3.4.4. Ecran horizontal (H)

Le bilan de puissance appliqué à l'écran H conduit à l'équation (112).

$$\Phi_H + \frac{\sigma(T_H^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,El}} + \frac{\sigma(T_H^4 - T_{El}^4)}{\mathfrak{R}_{H,El}} + \frac{T_H - T_0}{R_{TH0,H}} + \frac{T_H - T_3}{R_{TH3,H}} = 0 \quad (112)$$

où Φ_H est solution de l'équation (106).

Les résistances thermiques $R_{TH0,H}$ et $R_{TH3,H}$ de sections égales à celle de $A_{3,S}$, sont respectivement données par (113) et (114).

$$R_{TH0,H} = \frac{l_{H0}}{k_S(T_{H,0}) \times A_{3,S}} \quad (113)$$

$$R_{TH3,H} = \frac{l_{3H}}{k_S(T_{3,H}) \times A_{3,S}} \quad (114)$$

$T_{H,0}$ et $T_{3,H}$ sont des moyennes respectives de T_H plus T_0 , et de T_H plus T_3 . $l_{H,0}$ et $l_{3,H}$ sont les longueurs des tiges reliant respectivement l'écran H et le réservoir d'azote et entre l'écran H et la cellule de mesure ($l_{H,0} = 4.10^{-2}$ m et $l_{3,H} = 14.10^{-2}$ m).

3.4.5. Enceinte à vide (V)

Le bilan de puissance est appliqué dans la partie supérieure et la partie inférieure de l'enceinte à vide.

i. Partie supérieure de V (VS)

Le bilan de puissance est appliqué sur la partie supérieure de l'enceinte à vide (équation (115)).

$$\mathfrak{S}_{ES,VS} \sigma(T_{ES}^4 - T_{VS}^4) + \frac{T_{ES} - T_{VS}}{R_{THES,VS}} + \frac{T_{VI} - T_{VS}}{R_{THV,V}} + \frac{T_S - T_{VS}}{R_{THS,VS}} + \frac{T_C - T_{VS}}{R_{THVS,C}} + \frac{T_P - T_{VS}}{R_{THV,P}} = 0 \quad (115)$$

Les résistances thermiques $R_{THV,V}$ et $R_{THVS,C}$ sont respectivement déterminées à partir des équations (116) et (117).

$$R_{THV,V} = \frac{l_{V,V}}{k_{In}(T_{V,V}) \times A_{V,V}} \quad (116)$$

$l_{V,V}$ est la longueur de la résistance ($l_{V,V} = 10^{-2}$ m), $A_{V,V}$ est la section de l'enceinte à vide ($A_{V,V} = 1,746.10^{-3}$ m²). k_{In} est la conductivité thermique de l'inox 304L. $T_{V,V}$ est la demi-somme des températures T_{VI} de la partie inférieure et T_{VS} de la partie supérieure de l'enceinte à vide.

$$R_{THVS,C} = \frac{l_{V,V}}{k_{In}(T_{VS,C}) \times A_{V,V}} \quad (117)$$

$T_{VS,C}$ est la demi-somme des températures T_{VS} et T_C .

La résistance thermique $R_{THS,VS}$ correspond à la résistance thermique d'un tube cylindrique de rayon externe R_{eq} égale à celui de l'enceinte calorimétrique et de rayon interne R_V égale à celui de l'enceinte à vide. La longueur L_S du tube constitué par cette résistance est de 0,465 m.

$$R_{THS,VS} = \frac{1}{2\pi k_{St} L_S} \ln\left(\frac{R_{eq}}{R_V}\right) \quad (118)$$

Le contact entre l'enceinte à vide et le plateau du Styrodur® est assuré par un joint en téflon constituant ainsi une résistance thermique $R_{THP,V}$.

$$R_{THP,V} = \frac{l_{P,V}}{k_{Tef}(T_{P,VS}) \times A_{Tef}} \quad (119)$$

$l_{P,V}$ est l'épaisseur du joint ($l_{P,V} = 2.10^{-3}$ m), k_{Tef} et A_T sont respectivement sa conductivité thermique et sa section ($k_{Tef} = 0,21$ W m⁻¹ K⁻¹, $A_{Tef} = 1,1.10^{-2}$ m²). $T_{P,VS}$ est la demi-somme des températures T_P et T_{VS} .

ii. Partie inférieure de V (VI)

L'équation (120) appliquée à la partie inférieure de l'enceinte à vide est obtenue par bilan de puissance thermique.

$$\begin{aligned} & \mathcal{S}_{EI,VI} \sigma (T_{EI}^4 - T_{VI}^4) + \frac{T_{EI} - T_{VI}}{R_{THE,VI}} + \frac{T_{VS} - T_{VI}}{R_{THV,V}} + \\ & (T_I - T_{VI}) \times \left(\frac{1}{R_{THV,SI}} + \frac{1}{R_{TH4}} + \frac{1}{R_{TH5}} + \frac{1}{R_{TH6}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (120)$$

La résistance thermique $R_{THV,SI}$ possède les mêmes caractéristiques géométriques que la résistance $R_{THS,VS}$ excepté la longueur du tube cylindrique L_I qui est de 0,495 m.

Les résistances thermiques R_{TH4} , R_{TH5} et R_{TH6} de la Figure 30 sont schématisées explicitement sur la Figure 40.

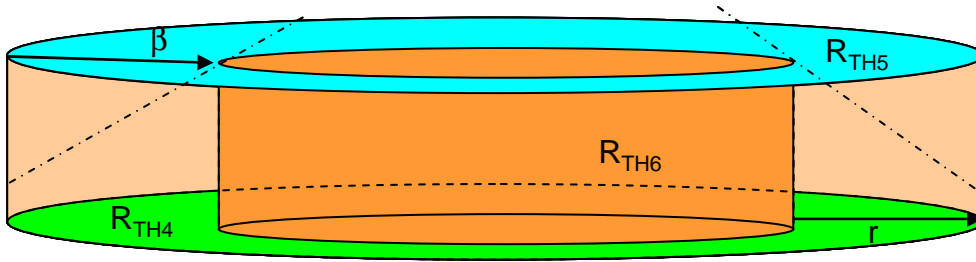


Figure 40 : Nomenclature des éléments pris en compte par la modélisation. La plaque de fond de Styrodur est découpée en trois éléments ayant respectivement des résistances thermiques R_{TH4} , R_{TH5} et R_{TH6}

Les expressions des résistances R_{TH4} , R_{TH5} et R_{TH6} sont données par les équations (122), (124) et (125) (d'après la Figure 27).

La section de la résistance thermique R_{TH4} est donnée par l'équation (121) (Figure 41).

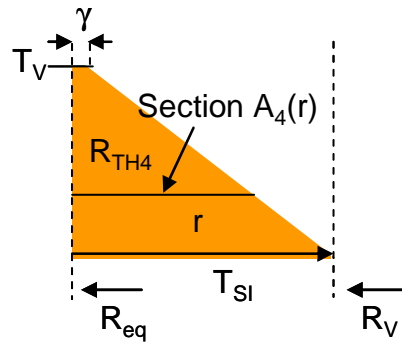


Figure 41 : Section du tube de flux permettant de calculer la résistance thermique R_{TH4}

$$A_4(r) = \pi R_V^2 \left[\left(1 + \frac{r}{R_V} \right)^2 - 1 \right] \quad (121)$$

Ainsi :

$$R_{TH4} = \frac{1}{\pi \times k_{St} \times R_V^2} \int_{\gamma}^{R_{eq}-R_V} \frac{dr}{\left[\left(1 + \frac{r}{R_V} \right)^2 - 1 \right]} \quad (122)$$

L'intégrale n'étant pas définie en 0, γ est une valeur très petite tendant vers 0. Pour le calcul de R_{TH5} , nous avons pris une valeur de γ égale à 10^{-4} m. k_{St} est la conductivité thermique du Styrodur® (k_{St} est égale à $0.034 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) et R_V est le rayon extérieur de l'enceinte à vide du calorimètre ($R_V = 0.14$ m)

La section de la résistance thermique R_{TH5} illustrée par la Figure 42 est donnée par l'équation (123).

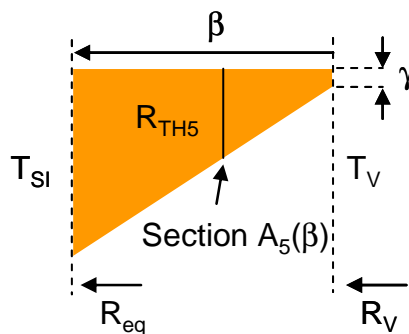


Figure 42 : Section du tube de flux permettant de calculer la résistance R_{TH5}

$$A_5(\beta) = \frac{2\pi e}{R_{eq} - R_V} \beta(\beta - R_V) \quad (123)$$

$$R_{TH5} = \frac{(R_{eq} - R_V)}{2\pi e k_{St}} \int_{R_V + \gamma}^{R_{eq}} \frac{d\beta}{\beta(\beta - R_V)} \quad (124)$$

$$R_{TH6} = \frac{e}{k_{St} \times \pi \times R_V^2} \quad (125)$$

Le paramètre e est l'épaisseur de la plaque de Styrodur® servant d'appui à l'enceinte à vide ($e = 100$ mm).

3.4.6. Couvercle de l'enceinte à vide (C)

Le bilan de puissance sur le couvercle de l'enceinte à vide répond à l'équation (126).

$$\Phi_C + \mathfrak{S}_{C,a} \sigma(T_a^4 - T_C^4) + (T_0 - T_C) \times \left(\frac{1}{R_{TH0,C}} + \frac{2}{R_{TH0}} \right) + \frac{T_{VS} - T_C}{R_{THC,V}} + h_C \times S_C \times (T_a - T_C) = 0 \quad (126)$$

avec $\mathfrak{S}_{C,a} = \frac{1 - \varepsilon_C(T_C)}{\varepsilon_C(T_C) \times S_C} + \frac{1}{S_C} + \frac{1 - \varepsilon_a}{\varepsilon_a \times S_a}$ et Φ_C est solution de l'équation (106).

$\varepsilon_C(T_C)$ est l'émissivité de la surface S_C du couvercle calculé à partir de l'équation (80) et ε_a est l'émissivité du milieu ambiant supposé égale à 1, S_a est sa surface, elle est considérée comme étant isotherme, sa température est notée T_a . L'expression de $R_{TH0,C}$ est donnée par l'équation (127).

$$R_{TH0,C} = \frac{1}{k_m(T_{0,C})} \times \left(\frac{l_{0,C1}}{A_{0,C1}} + \frac{l_{0,C2}}{A_{0,C2}} \right) \quad (127)$$

$T_{0,C}$ est la moyenne des températures T_0 du réservoir d'azote et T_C du couvercle de l'enceinte à vide. $A_{0,C1}$ et $A_{0,C2}$ sont des sections des deux résistances en série constituées par le support du réservoir d'azote ($A_{0,C1} = 7,54 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, $A_{0,C2} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$). Les longueurs $l_{0,C1}$ et $l_{0,C2}$ sont respectivement égales à 0,2 m et 0,08 m.

$$R_{TH0} = \frac{l_0}{2 \times k_{Cu}(T_{0C}) \times A_1} + \frac{l_{01}}{k_{Cu}(T_C) \times A_T} + \frac{l_{02}}{k_m(T_C) \times A_T} \quad (128)$$

l_0 est la longueur des amenées de courant jusqu'à la tulipe de connexion ($l_0 = 0,38$ m), l_{01} est la longueur de la partie cuivre de la tulipe ($l_{01} = 0,05$ m), et l_{02} est la longueur de sa partie Inox ($l_{02} = 0,08$ m). A_T est la section de la tulipe, elle est considérée comme étant droite et de valeur égale à $1,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

La résistance thermique $R_{THC,V}$ est donnée par l'équation (129).

$$R_{THC,V} = \frac{l_{C,V}}{k_m(T_{C,V}) \times A_{C,V}} \quad (129)$$

où $l_{C,V}$ est la hauteur de la bride inférieure constituant $R_{THC,V}$ ($l_{C,V} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ m) et $A_{C,V}$ est sa section ($A_{C,V} = 6,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$), $T_{C,V}$ est la moyenne des températures T_C et T_{VS} .

h_C est le coefficient de convection naturelle de l'air sur le couvercle de l'enceinte calorimétrique (Tableau 5), il est calculé à partir de l'équation (130) [Brau2006].

$$h_C = 1.78 \times \Delta T^{0.25} \quad (130)$$

où ΔT ($\Delta T = T_C - T_a$) est l'écart de température entre l'air et la paroi en présence.

3.4.7. Couvercle du Styrodur® (P)

Par bilan de puissance sur le couvercle du Styrodur® en inox, on obtient l'équation (131).

$$\frac{T_{VS} - T_P}{R_{THP,V}} + \mathfrak{S}_{P,a} \sigma (T_a^4 - T_P^4) + h_P \times S_P \times (T_a - T_P) = 0 \quad (131)$$

avec $\mathfrak{S}_{P,a} = \frac{1 - \varepsilon_P(T_P)}{\varepsilon_P(T_P) \times S_P} + \frac{1}{S_P} + \frac{1 - \varepsilon_a}{\varepsilon_a \times S_a}$.

$\varepsilon_P(T_P)$ est l'émissivité de la surface S_P du couvercle du Styrodur® en fonction de la température T_P de ce dernier. Cette émissivité est calculée à partir de l'équation (80). Le coefficient d'échange h_P est calculé également à l'aide de l'équation (130).

3.4.8. Surface du film isolant à faible émissivité

En considérant la partie supérieure et la partie inférieure du calorimètre, elles répondent respectivement aux équations (132) et (133).

$$\frac{T_{VS} - T_S}{R_{THS,VS}} + \mathfrak{S}_{S,a} \sigma (T_a^4 - T_S^4) + h_S \times S_S \times (T_a - T_S) = 0 \quad (132)$$

avec $\mathfrak{S}_{S,a} = \frac{1 - \varepsilon_S}{\varepsilon_S \times S_S} + \frac{1}{S_S} + \frac{1 - \varepsilon_a}{\varepsilon_a \times S_a}$

$$\mathfrak{S}_{I,a} \sigma (T_a^4 - T_I^4) + (T_{VI} - T_I) \times \left(\frac{1}{R_{THVSI}} + \frac{1}{R_{TH4}} + \frac{1}{R_{TH5}} + \frac{1}{R_{TH6}} \right) + h_I \times S_I \times (T_a - T_I) = 0 \quad (133)$$

avec $\mathfrak{S}_{I,a} = \frac{1 - \varepsilon_I}{\varepsilon_I \times S_I} + \frac{1}{S_I} + \frac{1 - \varepsilon_a}{\varepsilon_a \times S_a}$.

Les coefficients d'échange h_S et h_I sont également calculés à partir de l'équation (130).

3.5. Ordre de grandeur des résistances thermiques de conduction

Les ordres de grandeur des résistances thermiques de conduction utilisées dans le modèle sont donnés dans le Tableau 9. Les valeurs calculées sont données pour $k_{Cu} = 389 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $k_{In} = 15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $k_S = 0,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $k_{St} = 0,034 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ lorsque ces résistances sont maintenues à température de 300 K

Résistance thermique de conduction	Ordre de grandeur [W/°C]
R_{TH1}	$1,80.10^2$
R_{TH1S}	$1,17.10^4$
R_{TH23}	$4,54.10^{-4}$
R_{TH3}	$1,03.10^3$
R_{TH3S}	$3,6.10^3$
$R_{THEI,VI}$	$3,2. 10^3$
$R_{THE,E}$	0,13
$R_{THES,VS}$	$0,53.10^2$
$R_{TH0,H}$	$7,96.10^2$
$R_{TH3,H}$	$2,79.10^3$
$R_{THV,V}$	0,38
$R_{THVS,C}$	0,38
$R_{THS,VS}$	2,44
$R_{THP,V}$	0,86
$R_{THV,SI}$	11,89
R_{TH4}	$1,63.10^2$
R_{TH5}	30,68
R_{TH6}	47,76
$R_{TH0,C}$	$2,21.10^2$
R_{TH0}	$6,26.10^2$
$R_{THC,V}$	$2,7.10^{-2}$

Tableau 9 : Ordres de grandeur des résistances thermiques de conduction utilisées dans le modèle analytique des échanges de chaleur en régime stationnaire. Les valeurs données dans ce tableau sont obtenues lorsque chacune de ces résistances est maintenue à une température de 300 K

3.6. Synthèse du modèle

Le modèle analytique des échanges thermiques que nous venons de présenter s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- surfaces des éléments du calorimètre sont considérées comme étant grises, opaques et parfaitement diffusantes,
- les échanges par rayonnement des supports et amenées de courant sont négligés,
- les grandeurs telles que les conductivités thermiques et les émissivités totales hémisphériques des constituants sont paramétrées en fonction de la température et ne dépendent que de cette dernière. Cette dépendance en température permet de prendre en compte la modification du système lorsque la température varie.

Les 12 équations du modèle (89), (92), (94), (103), (110), (112), (115), (120), (126), (131), (132) et (133) sont établies à partir de l'analogie électrique des échanges thermiques (Figure 31) en effectuant le bilan de puissance sur les nœuds : T_1 , T_2 , T_3 , T_H , T_{Ei} , T_{Es} , T_{Vi} , T_{Vs} , T_P , T_C , T_{Si} , T_{Ss} . La résolution de ces équations est effectuée avec le logiciel Wolfram Mathematica®.

4. Conclusion

L'architecture de notre calorimètre a été définie et optimisée à l'aide d'un modèle analytique des échanges de chaleur, en prenant en compte l'environnement du calorimètre. Après un rappel sur les transferts de chaleur, nous avons décrit le modèle analytique des échanges de chaleur. Ce modèle tient compte de l'évolution des propriétés thermiques des matériaux utilisés.

Ce modèle a permis en outre d'analyser les températures des différents éléments du dispositif calorimétrique en régime stationnaire, permettant ainsi d'optimiser et de dimensionner le calorimètre.

Les résultats des calculs obtenus par le modèle et leurs interprétations sont présentés au cours du Chapitre IV,

5. Références

- [Ashcroft2003] Neil-W Ashcroft, N-David Mermin, Franck Biet, Hamid Kachkachi, "Physique des solides" *EDP Sciences Editions*, pp.65 – 66, 2003.
- [Boeckle2006] Christoph Boeckle, "Résumé Théorie des métaux de Drude", *Physique du solide I*, Février 2006.
- [Brau2006] J. Brau, «Convection» *Département de Génie Civil et Urbanisme*, INSA de Lyon, 2006.
- [Child1973], G. Child, L.J. Erics, R.L. Powell, "Thermal Conductivity of Solids at Room Temperature and Below", *NBS Monograph 131*, 1973.
- [Cutnell1998] J. D. Cutnell, et K. W. Johnson. "Physics". 4thEdition. *New York: Wiley*, 1998: pp. 591.
- [Davisson1924] C. Davisson, J. R. Weeks, "The relation between the total thermal emissive power of a metal and its electrical resistivity", *J. Opt. Soc. Am*, Vol.8, pp.581-602, 1924.
- [Degallaix2007] S. Degallaix, M. Boussuge, B. Ilschner, J.-M. Chaix "Caractérisation expérimentale des matériaux : propriétés physiques, thermiques et mécaniques (Relié) ", *PPUR presses polytechniques*, pp. 121 – 124, 2007.
- [Elert2004] Glenn Elert, "The Physique Factbook", *An Encyclopedia of Scientific Essays* 2004.
- [Feingold1970] Feingold, A. and Gupta, K.G., 1970, "New analytical approach to the evaluation of configuration factors in radiation from spheres and infinitely long cylinders," *J. Heat Transfer*, vol. 92, no. 1, pp. 69-76, February.
- [Feingold1978] Feingold, A., "A new look at radiation configuration factors between disks," *J. Heat Transfer*, vol. 100, no. 4, pp. 742-744, November 1978.
- [Graves1991] R. S. Graves, T. G. Kollie, D. L. McElroy and K. E. Gilchrist, "The Thermal Conductivity of AISI 304L Stainless Steel", *International Journal of Thermophysique*, Vol.12, No.2, pp.409-415, 1991.
- [Hust1984] J.C. Hust, "Thermal Conductivity Of Glass Fiber/Epoxy Composite Support Bands For Cryogenic Dewars", *Phase II NBS, Boulder* 1984.
- [Jannot2008]. Y. Jannot, "Théorie et pratique de la métrologie thermique", Séminaire *PER AUF « Métrologie thermique »*, LEA Dakar, 12-18/11/2008,
- [Lloyd1998] Lloyd, David H. "Physics Laboratory Manual". 2ndEdition. *Florida: Saunders College Publishing*, pp. 562, 1998
- [Marquardt2000] E.D. Marquardt, J.P. Le, and Ray Radebaugh, "Cryogenic Material Properties Database", *11th International Cryocooler Conference*, 2000.
- [Naraghi1982] Naraghi, M.H.N. and Chung, B.T.F., "Radiation configuration between disks and a class of axisymmetric bodies," *J. Heat Transfer*, vol. 104, no. 3, pp. 426-431, August 1982.
- [OERN2002] OERN (Organisation Européen pour la Recherche Nucléaire), "Spécification Technique Fabrication de tube de Haute Précision en Cuivre", *SL-Spec 2000-26 BT*, April 2002.

- [Rea1975] S. Rea N., "Rapid method for determining concentric cylinder radiation view factors", *AIAA J.*, vol. 13, no. 8, pp. 1122-1123, 1975.
- [Reboux2008] P. Raboux, D. Marchio, "Introduction aux transferts thermiques", *Presses de l'Ecole des Mines Paris*, pp. 2, Avril 2008.
- [Roger1979] C. R. Roger et al, "Temperature variation of hemispherical emissivity of stainless steel AISI 304", *Journal of Optical Society Am.* Vol.69 No.10, pp.1384 – 1390, 1979.
- [Sievers1980] A. J. Sievers", The emissivity of metals," in *Solar Materials Science*, L. E. Murr, ed. (Academic, New York, 1980), pp. 229-254.
- [Simon1992] N.J. Simon, E.S. Drexler, and R.P. Reed "Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperature" *NIST Monograph 177* February 1992, pp. 7-23.
- [Sundqvist1992] Bertil Sundqvist, "Thermal diffusivity and thermal conductivity of Chromel, Alumel, and Constantan in the range 100 – 450K", *Journal of Applied Physics*, Vol.72, pp.539 – 545, July 1992.
- [Touloukian1976] Y.S Touloukian and C.Y. Ho "Thermophysical Properties of Selected Aerospace Materials" Part II: *Thermophysical Properties of Seven Materials*, p.39-46, 1976.

Chapitre IV Dimensionnement et faisabilité

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats de calculs obtenus à partir du modèle analytique des échanges de chaleur dans le calorimètre afin d'effectuer son dimensionnement et sa réponse thermique. Aussi, l'influence de la géométrie et des matériaux constituant les éléments du calorimètre est analysée, afin de pouvoir dégager une sensibilité théorique du dispositif calorimétrique. Nous avons également effectué quelques calculs simples par éléments finis avec Flux2D® et Samcef Field 6.2® afin de valider certaines hypothèses. Ces résultats ne seront cependant pas présentés car ils n'apportent pas un éclairage supplémentaire.

2. Analyse de résultats du modèle

Les résultats du modèle analytique nous ont permis de réaliser l'étude de faisabilité et le dimensionnement thermique du calorimètre. Ces résultats sont présentés dans ce paragraphe.

Les résultats présentés dans ce paragraphe correspondent au régime thermique stationnaire. Dans nos calculs, le support de la cellule de mesure est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre, sauf dans le cas indiqué. On appellera systématiquement « température cellule » la température de la surface externe dénommée T_3 dans la modélisation. La température du milieu extérieur au calorimètre (i.e. air) sera dénommée par la suite « température ambiante ».

Pour tous les résultats présentés sous la forme d'une courbe, il est important de noter que les valeurs discrètes calculées sont systématiquement reliées par une interpolation linéaire.

2.1. Influence de la température du milieu extérieur au calorimètre

L'influence de la température du milieu extérieur au calorimètre est mise en évidence par un calcul visant à observer l'évolution du flux thermique entrant dans le calorimètre et dans la cellule en fonction de la température du milieu extérieur au calorimètre (Température ambiante, Figure 43).

Les simulations sont réalisées sans génération de puissance dans la cellule de mesure et dans le composant. Seule la température du milieu extérieur (Température ambiante) prend des valeurs comprises entre 288 K et 306 K. L'émissivité ϵ_H de la surface de l'écran H est fixée à 0,1 et celle du composant est égale à l'unité.

Les puissances thermiques entrant dans le calorimètre et dans la cellule de mesure sont respectivement évaluées à 4,96 W et 0,26 W lorsque la température du milieu extérieur est fixée à 300 K. Le flux entrant dans l'enceinte calorimétrique est logiquement plus important que celui entrant dans la cellule de mesure, l'essentiel du flux entrant étant absorbé par le point froid (réservoir d'azote liquide).

On observe que les deux puissances thermiques entrant, augmentent linéairement avec l'augmentation de la température du milieu extérieur (Température ambiante). Ainsi, la pente de la puissance entrant dans le calorimètre est évaluée à $57,2 \text{ mW K}^{-1}$. Par conséquent, toute variation de la température du milieu extérieur au calorimètre équivalente à $1 \text{ }^\circ\text{C}$ entraîne en théorie, une variation de puissance entrant égale à 57,2 mW.

Pour le flux entrant dans la cellule, l'évolution est également linéaire avec la température du milieu extérieur, cependant la pente de la courbe obtenue est

beaucoup plus faible, elle vaut $2,9 \text{ mW K}^{-1}$. Par conséquent, une variation de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de la température du milieu extérieur conduit en théorie à une variation de flux thermique sur la cellule égale à $2,9 \text{ mW}$.

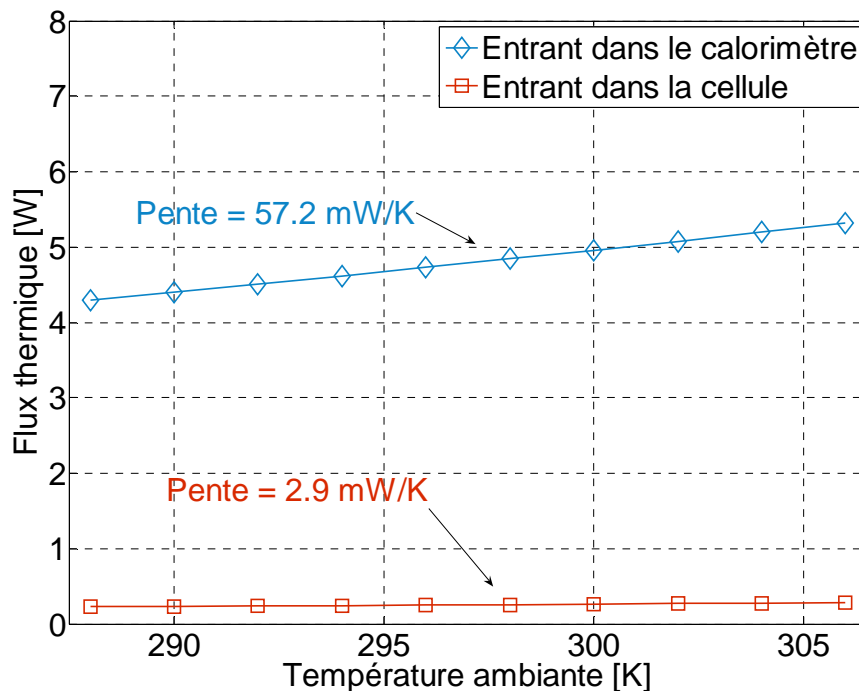


Figure 43 : Evolution du flux entrant dans le calorimètre et la cellule de mesure en fonction de la température ambiante sans génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$). Le flux entrant dans le calorimètre correspond à l'échange de chaleur par convection entre les surfaces externes du calorimètre (S_S , S_I , S_P et S_C) et l'air. Le flux entrant dans la cellule de mesure correspond à la chaleur échangée entre la surface externe S_3 de la cellule et les éléments environnants (S_0 , S_H , S_{EI})

La Figure 44 montre l'évolution simulée de la température de la cellule de mesure en fonction de la température du milieu extérieur au calorimètre pour des puissances de régulation fournies à la cellule de mesure fixées à $4,5 \text{ W}$, $1,73 \text{ W}$ et 1 W . On observe, par exemple, que ces puissances permettent de maintenir la cellule à des températures respectives de 475 K , 300 K et 225 K lorsque la température du milieu extérieur est fixée à 300 K .

Dans tous les cas, la température de la cellule de mesure augmente lorsque la température du milieu extérieur augmente. Cependant, la variation (i.e. pente) observée de la température de la cellule de mesure diminue avec l'augmentation de la puissance fournie par la régulation.

Pour limiter l'influence du milieu extérieur sur la température de la cellule de mesure, il est nécessaire de travailler avec une température ambiante la plus stable possible.

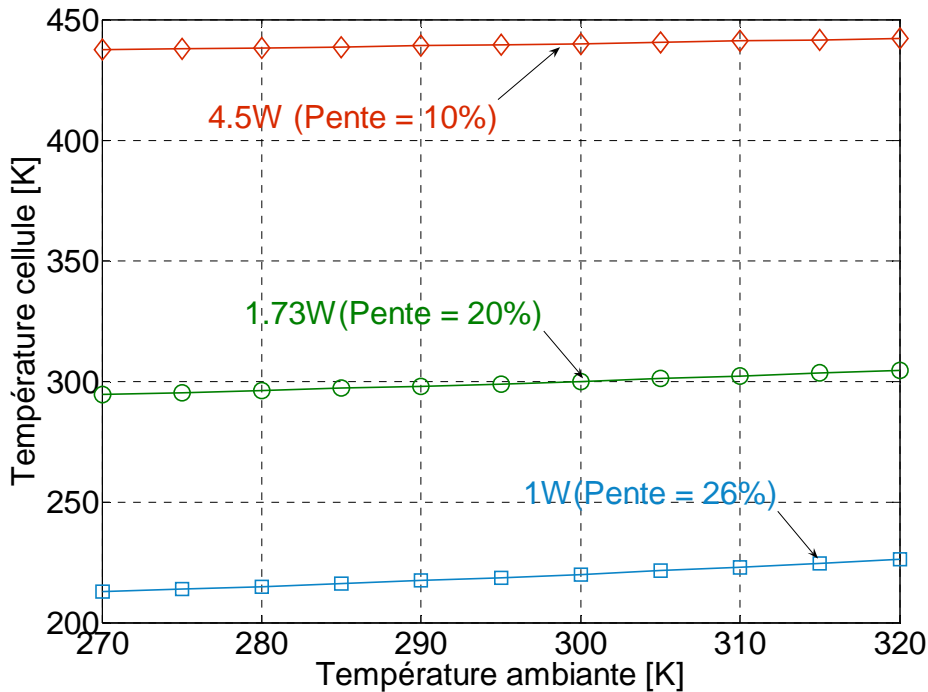


Figure 44 : Evolution de la température de la surface externe de la cellule en fonction de la température ambiante pour différentes puissances fournies par la régulation (i.e. Q_3) sans génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$)

2.2. Cartographie thermique du calorimètre

L'évolution des températures des différents éléments du calorimètre est observée en simulant la variation de la puissance thermique fournie à la cellule de mesure par la régulation (Figure 45). L'émissivité du composant et celle de l'écran H gardant la même valeur qu'au paragraphe précédent, le calcul est effectué en fixant à chaque fois la puissance fournie à la cellule de mesure par la régulation. La température ambiante est fixée à 300 K durant tous nos calculs.

En l'absence de génération de puissance dans le système, la température de la cellule de mesure peut descendre jusqu'à 225 K.

On observe d'une part que la température de la cellule évolue nettement avec la puissance fournie par la régulation, et d'autre part que les températures des parties inférieure et supérieure de l'enceinte à vide ainsi que dans le Styrodur® restent quasiment constantes dans toute la gamme de puissance fournie.

On peut également observer que les températures de l'écran E et H évoluent sensiblement avec la puissance fournie par la régulation.

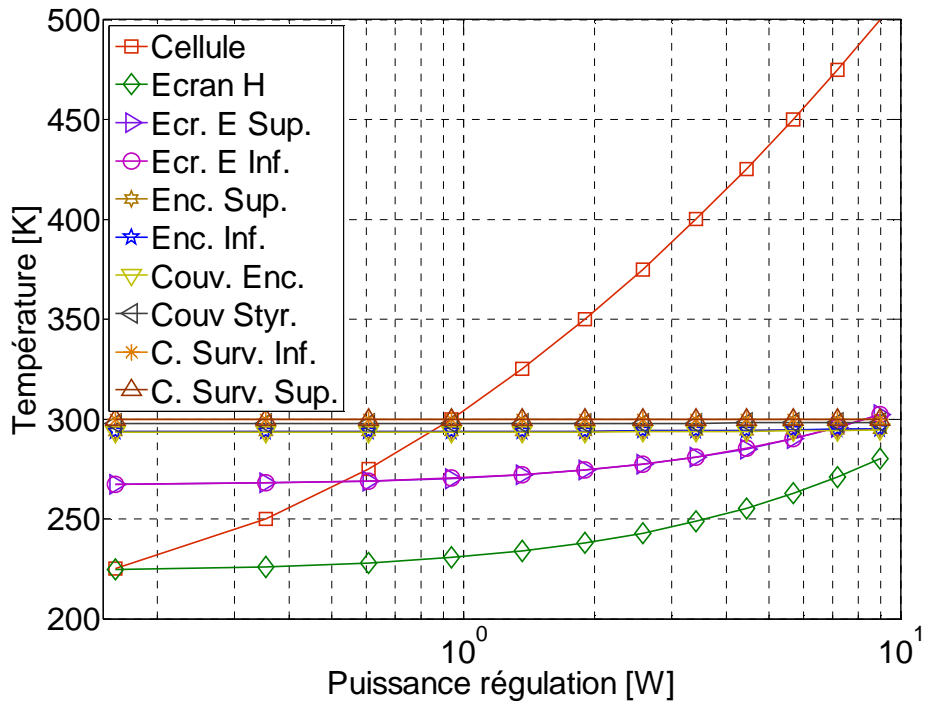


Figure 45 : Cartographie des températures des principaux éléments du calorimètre en fonction de la puissance de régulation de la cellule (Q_3). Il n'y pas de génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$)

2.3. Influence de l'écran H

Pour observer l'influence de l'écran H sur la température de la cellule de mesure, une simulation du chauffage de la cellule par la régulation en présence et en absence de l'écran H est effectuée (Figure 46). On fait varier la puissance fournie par la régulation entre 1 W et 10 W. Ce calcul à été effectué à l'aide d'un modèle analytique beaucoup plus simple, l'objectif étant d'observer l'influence ou non de l'écran H.

On trouve que la température de la cellule évolue logiquement avec la puissance fournie par la régulation en présence ou non de l'écran H. On observe cependant une évolution nettement plus sensible en présence de l'écran H. Ce dernier favorise donc la montée en température de la cellule par limitation du flux thermique émis par le réservoir d'azote.

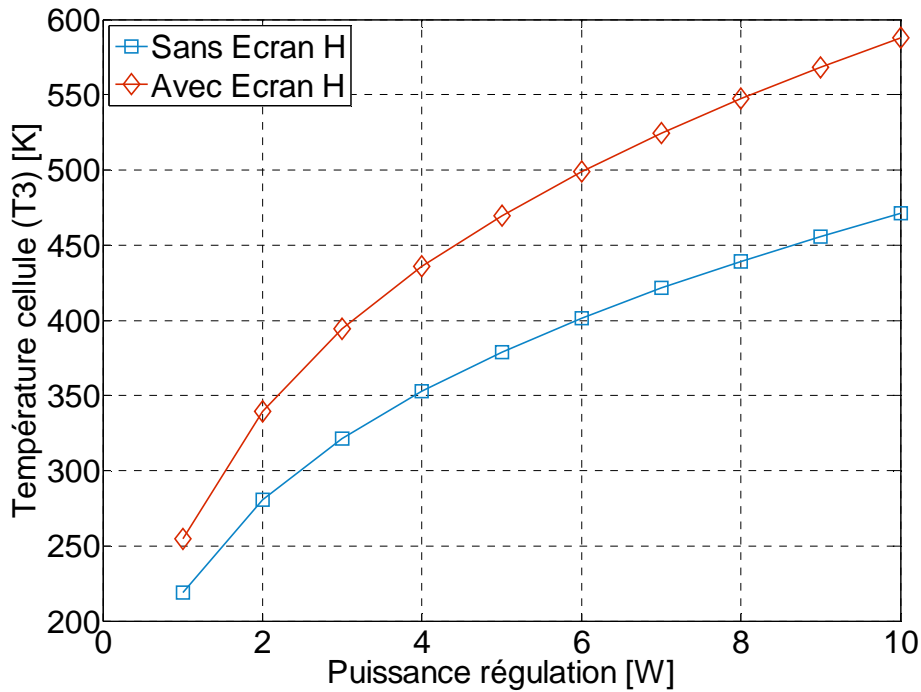


Figure 46 : Evolution de la température de la surface externe de la cellule en fonction de la puissance de régulation Q_3 avec et sans écran horizontal H. Il n'y a pas de génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$)

L'influence de l'émissivité de l'écran H sur les températures de la cellule, de l'écran H et E et sur l'enceinte à vide est mise en évidence sur la Figure 47. Les simulations sont réalisées sans génération de puissance dans le calorimètre. L'émissivité de H prend des valeurs entre 0,03 et 0.35.

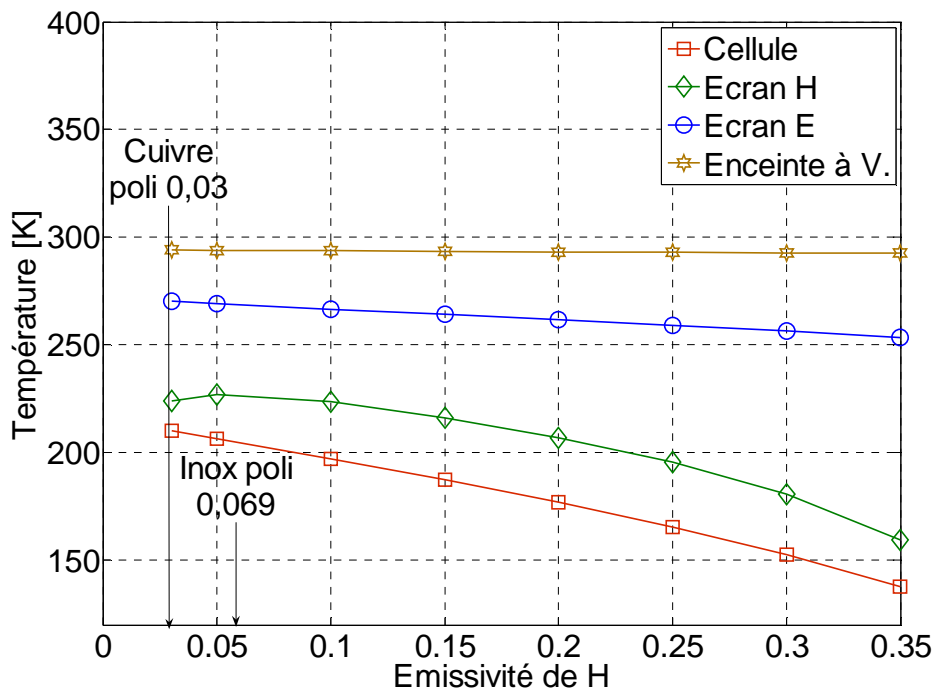


Figure 47 : Influence de l'émissivité de l'écran horizontal H sur les températures des éléments S_3 , S_H , S_E et S_V en l'absence de génération de puissance (i.e. $Q_1 = Q_3 = 0$) pour une température ambiante fixée à 300K

Les températures de la cellule de mesure, de l'écran H et de l'écran E diminuent lorsque l'émissivité de l'écran H augmente. La diminution de la température de l'enceinte à vide reste, quant-à elle, très faible. Cette diminution des températures est directement liée au refroidissement notable de H lorsque son émissivité augmente.

En conséquence, le contrôle de l'émissivité de l'écran H fournit une possibilité de piloter la température minimale atteinte par la cellule de mesure.

2.4. Influence du matériau de l'amenée de courant sur le rayonnement du composant à l'intérieure de la cellule de mesure

Les simulations sont effectuées pour deux types de matériaux constituant l'amenée de courant de 1 mm de diamètre : le cuivre et le constantan. Le flux thermique généré dans le composant électrique est fixé à 100 mW. Ces calculs visent à comparer le ratio en pourcentage du flux rayonné par le composant sur le flux total généré dans ce dernier.

Pour le cuivre, la Figure 48 montre que le ratio du flux rayonné sur le flux total évolue avec la température de la cellule de mesure. Il reste inférieur à 99,5 % jusqu'à 380 K. Au-delà de cette température, ce ratio augmente jusqu'à atteindre une valeur de 99,7 % à 440 K.

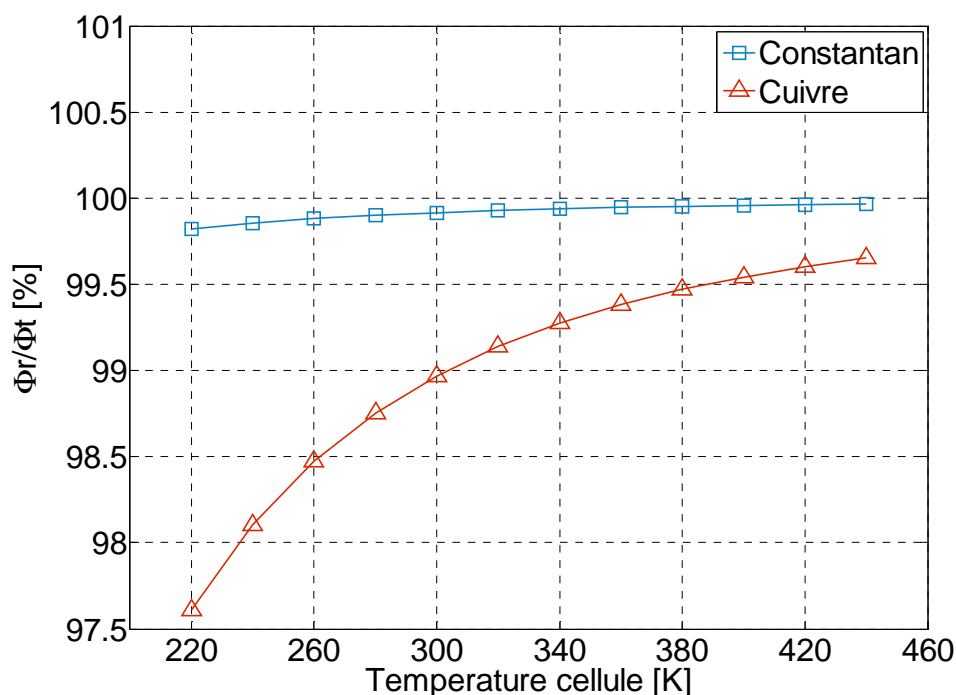


Figure 48 : Evolution du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier avec la cellule en fonction de la température de celle-ci lorsque l'on considère des amenées de courants en cuivre et en constantan. Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle

Quant au constantan, la Figure 48 montre une augmentation du ratio qui est moins prononcée que celle du cuivre. La courbe du ratio donnée par le constantan

reste au dessus de celle du cuivre et vaut au minimum 99,8 % à 220 K. Elle atteint une valeur de 99,98 % à 440 K.

En conséquence, le constantan est très favorable au rayonnement du composant par rapport au cuivre, et constitue dans ce cas le meilleur compromis pour limiter les fuites thermiques par conduction dans les amenées de courant. Ceci constitue un des critères majeurs du choix des matériaux pour l'amenée de courant.

Par la suite, dans toutes nos simulations, les amenées de courant à l'intérieur de la cellule sont prises en constantan.

2.5. Influence de l'émissivité

L'influence de l'émissivité de la surface intérieure de la cellule et de celle de la surface du composant à tester est étudiée dans ce paragraphe.

2.5.1. Surface interne de la cellule

Pour observer l'influence de l'émissivité de la surface interne de la cellule de mesure, une simulation du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier est réalisée. Les calculs du ratio sont effectués pour différentes valeurs d'émissivité de la surface interne de la cellule de mesure en fonction de la température de cette dernière (Figure 49). Le flux thermique total émis par le composant dans cette simulation est fixé à 100 mW, son émissivité est prise à la valeur 1 et celle de l'écran H est fixée à 0,1 (acier poli 304L).

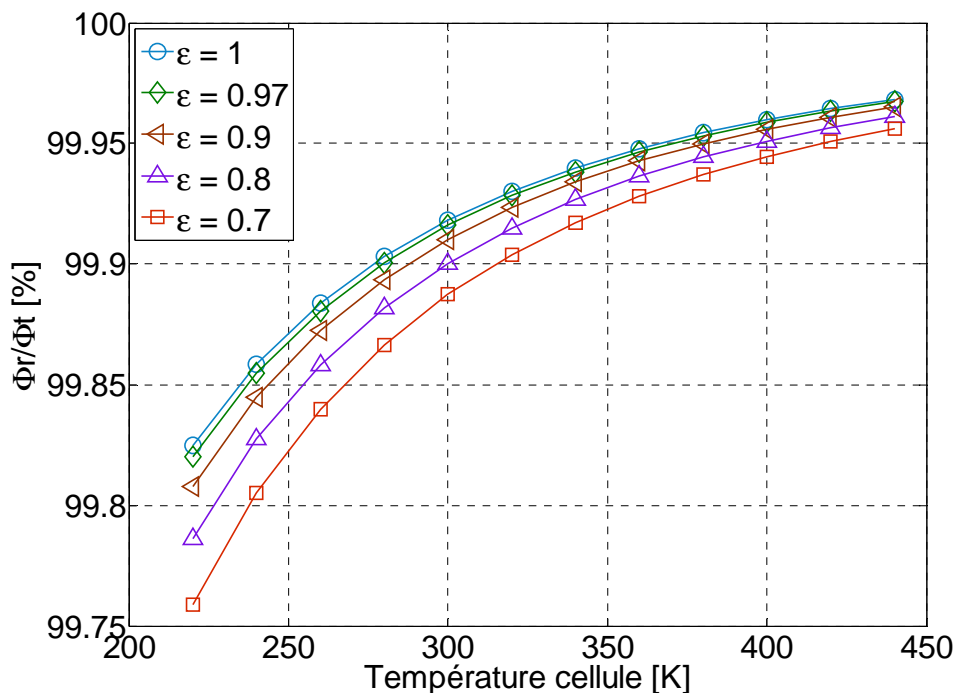


Figure 49 : Evolution du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier avec la cellule en fonction de la température de celle-ci lorsque l'on fait varier l'émissivité de la surface interne de la cellule. Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée, la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle

Pour les valeurs d'émissivité considérées, le ratio augmente avec la température de la cellule. Une émissivité de l'ordre de 0,7 représentant le pire des

cas, conduit à un ratio supérieur à 99,75 %. Les échanges thermiques par rayonnement sont donc bien prépondérants dans la cellule de mesure.

La peinture Nextel Velvet Coating 811-21® est appliquée à la surface interne de la cellule. Son émissivité totale normale est de 0,97 ; elle est constante avec la température entre -36 °C et +82 °C [Tang-Kwor2001] [Hameury2005]. L'émissivité spectrique hémisphérique de cette peinture varie entre 0,93 et 0,99 dans l'intervalle de longueur d'onde compris entre 1,5 µm et 15 µm [Ogarev2009]. La valeur effective de l'émissivité de la surface interne de notre cellule de mesure est supérieure à celle de la peinture grâce aux rugosités réalisées sur la surface interne de la sphère.

Une mesure de l'énergie réfléchiée par un laser Na-YGa de longueur d'onde 1 µm à l'aide du capteur Laser Power & Energy Meter gentec® a été effectuée dans une enceinte fermée. L'échantillon que nous avons utilisé est une plaque en cuivre sur laquelle nous avons mis trois couches de peinture Nextel. Cette expérience a permis de déterminer une valeur d'émissivité de la peinture de l'ordre de 0,997.

Nous pouvons donc penser que la valeur de l'émissivité de la surface interne de notre cellule de mesure est certainement plus importante.

Ainsi, notre cellule de mesure constitue une bonne approximation de corps noir capable d'absorber en très grande partie le rayonnement infrarouge émis par le composant testé.

2.5.2. Surface de l'éprouvette testée (composant)

Nous avons effectué une simulation du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total généré dans ce dernier. Ce ratio est observé en fonction de la température de la cellule de mesure et pour différentes valeurs de l'émissivité du composant. L'émissivité de la surface interne de la cellule de mesure est fixée à 0,97 et le flux thermique généré dans le composant est fixé à 100 mW.

La Figure 50 montre que le ratio augmente avec la température de la cellule. Ce ratio est amélioré lorsque l'émissivité du composant tend vers 1. On observe également qu'à faible émissivité du composant, égale à 0,6, le ratio est encore supérieur à 99,7 %.

La Figure 51 montre l'influence de l'émissivité du composant sur la température prise par ce dernier pour des puissances thermiques générées dans le composant de 0,1 mW, 1 mW, 10 mW et 100 mW.

Il apparaît que la température du composant diminue lorsque l'émissivité de ce dernier augmente. Cette diminution est plus marquée pour des valeurs d'émissivité comprises entre 0,1 et 0,4. Les courbes donnant la température du composant sont quasi-linéaires pour une valeur d'émissivité au-delà de 0,4 quelle que soit la puissance dissipée par le composant testé.

Les mesures de la puissance dissipée avec des composants à forte émissivité présente un meilleur ratio flux rayonné sur flux total généré par le composant testé et est par conséquent favorable au principe de mesure de notre calorimètre. Aussi, un composant à forte émissivité permet de limiter une forte élévation de la température de ce dernier.

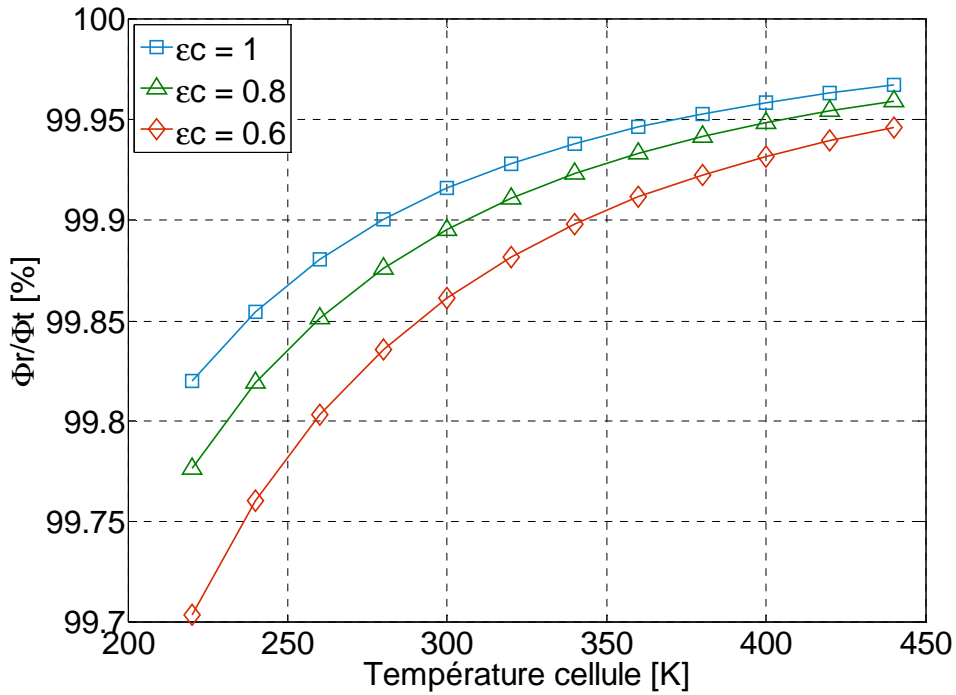


Figure 50 : Evolution du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier avec la cellule en fonction de la température de celle-ci lorsque l'on fait varier l'émissivité du composant. Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée, la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle

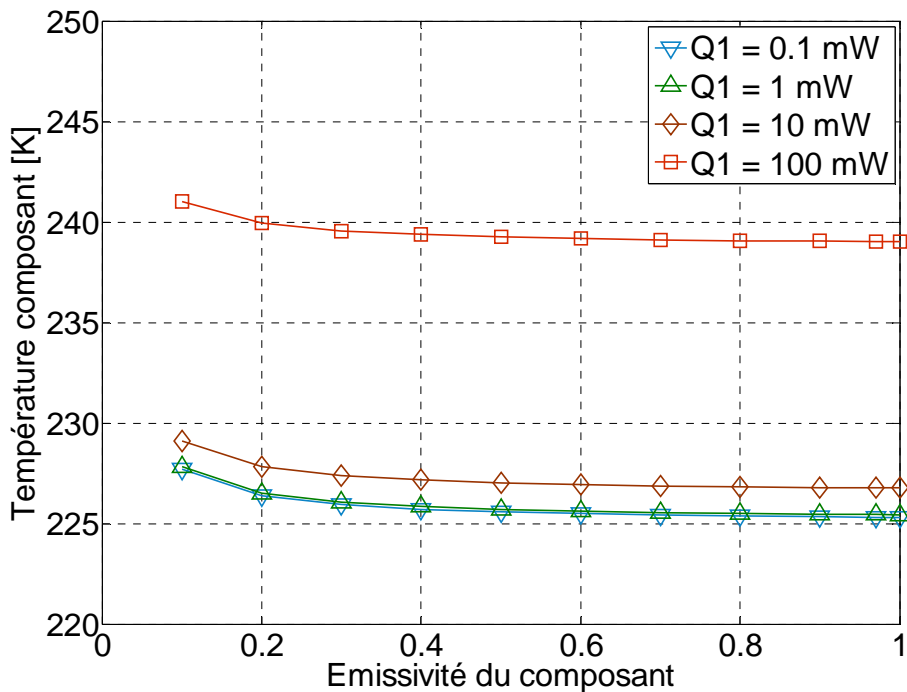


Figure 51 : Influence de l'émissivité du composant sur sa température pour différentes puissances générées par ce composant sans régulation de la cellule ($Q_3 = 0$). La température ambiante est fixée à 300K

La Figure 52 présente l'évolution comparative de la température du composant testé avec celle de la cellule de mesure en fonction de la puissance thermique maximale Q_{1max} mesurable. Q_{1max} mesurable est la puissance thermique qui, lorsqu'elle est fournie à la cellule de mesure, permet de la maintenir à une température T donnée. Cette puissance correspond donc à la puissance maximale mesurable à cette température lorsqu'elle est générée par le composant testé, comme nous le verrons au Chapitre V. Au lieu que la puissance Q_{1max} soit générée dans la cellule de mesure, elle est directement générée dans le composant à tester pour apprécier l'écart de température maximal entre ces deux éléments. L'émissivité du composant est fixée à 0,97 (peinture noire).

Ainsi, l'évolution des deux températures en fonction de Q_{1max} mesurable montre que ces dernières restent très voisines dans toute la gamme de température balayée, allant de -50°C à $+225^{\circ}\text{C}$. L'écart maximal obtenu lorsque la température de la cellule est fixée à 200°C reste inférieur à $1,5^{\circ}\text{C}$.

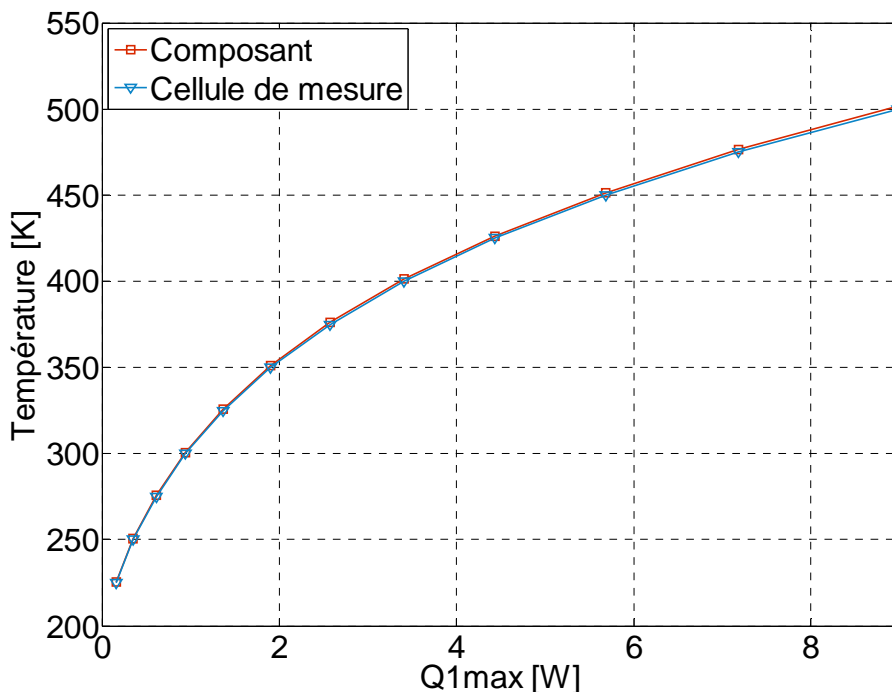


Figure 52 : Evolution des températures du composant et de la cellule en fonction de la puissance Q_{1max} permettant d'imposer une température T_3 . Pour maintenir la cellule à une température imposée T_3 , il faut fournir une puissance Q_3 sans génération de puissance dans le composant ou inversement on peut maintenir T_3 en apportant une puissance $Q_1 = Q_{1max}$ sans régulation. L'émissivité de la peinture est fixée à 0,97.

On peut donc considérer en théorie qu'en régime thermique établi, la température de la cellule de mesure est quasiment égale à celle du composant à tester.

2.6. Fuites thermiques de la cellule de mesure

La Figure 53 montre l'évolution comparative de la puissance dissipée par la cellule de mesure sous forme de conduction à travers les amenées de courant et le support de la cellule avec la puissance fournie par la régulation. Cette dernière correspond à la puissance nécessaire permettant de maintenir la cellule à une température T donnée. Dans nos calculs, l'émissivité de l'écran horizontal est égale à

0,1, la température du milieu extérieur au calorimètre est fixée à 300 K et la puissance fournie par la régulation varie entre 0,91 W et 4,47 W. Les amenées de courant dues aux capteurs de température ne sont pas prises en compte dans ces simulations.

On observe que la dissipation thermique à travers le support et les amenées de courant reste très voisine de la puissance fournie par la régulation au-dessous de 300 K. Cela traduit une prédominance de la déperdition de chaleur par conduction vis-à-vis du rayonnement thermique de la cellule à l'extérieur de celle-ci.

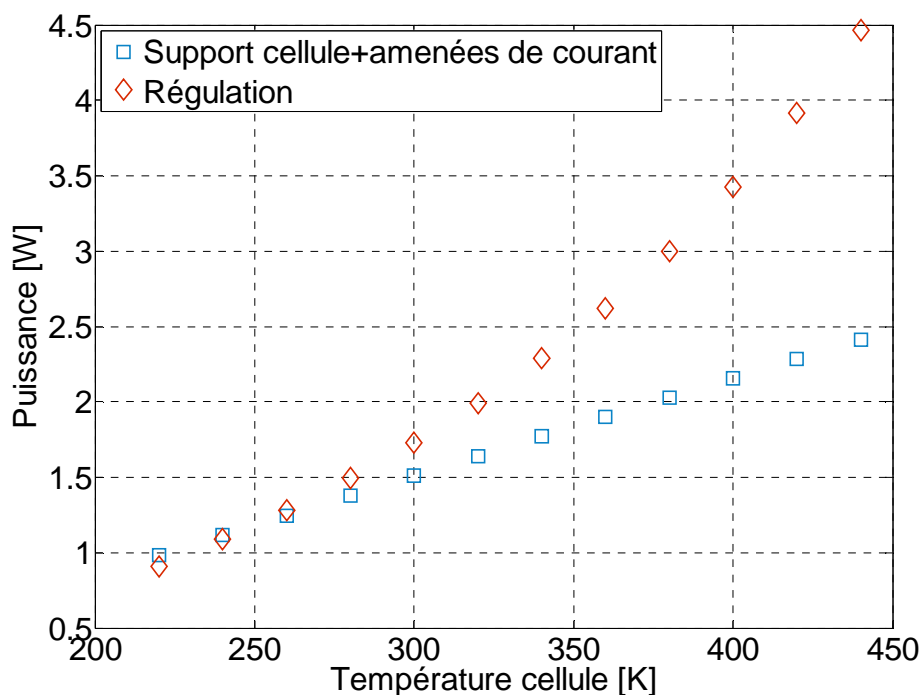


Figure 53 : Evolutions de la puissance fournie à la cellule par la régulation pour la maintenir à une température fixée T_3 et de la puissance dissipée par la cellule. La puissance dissipée correspond à la puissance échangée avec les éléments S_3 , S_H , S_E et S_V . Le flux total émis par le composant est nul ($Q_1 = 0$)

Cependant, au-delà de 300 K, la puissance fournie par la régulation devient de plus en plus importante devant la puissance dissipée par conduction. Le rapport entre ces deux puissances thermique est environ égal à deux vers 450 K. Par conséquent, la puissance thermique rayonnée entre 300 K et 450 K prend des proportions importantes mais reste tout de même inférieure à la puissance dissipée par conduction dans les amenées de courant et le support de la cellule dans notre gamme de mesure envisagée (-50 °C à +150 °C).

La déperdition d'énergie thermique à l'extérieur de la cellule est donc essentiellement réalisée par conduction à travers les amenées de courant et le support de la cellule. Cette déperdition d'énergie pourrait être beaucoup plus importante si l'on tient compte des amenées de courant des capteurs de température de la cellule.

2.7. Détail des fuites thermiques

Les fuites thermiques sont dues essentiellement à la conduction à travers les amenées de courant, les supports du composant et de la cellule de mesure au

réservoir d'azote. Le réservoir d'azote et son support à la bride supérieure sont des reprises de l'ancien calorimètre [Seguin1997]. Pour diverses raisons, nous avons choisi de reprendre intégralement cette partie de l'ancien dispositif. Nous ne pouvons donc que constater les fuites transmises par conduction à travers le support du réservoir d'azote. Seules les fuites thermiques à travers les amenées de courant, le support du composant et le support de la cellule de mesure peuvent être minimisées.

2.7.1. Supports et amenées de courant

Un calcul des fuites thermiques à travers les supports de la cellule et du composant, ainsi qu'à travers les amenés de courant a été effectué. L'évolution de ces fuites est observée en fonction de la température de la cellule de mesure, pour une puissance de 100 mW générée par le composant (Figure 54).

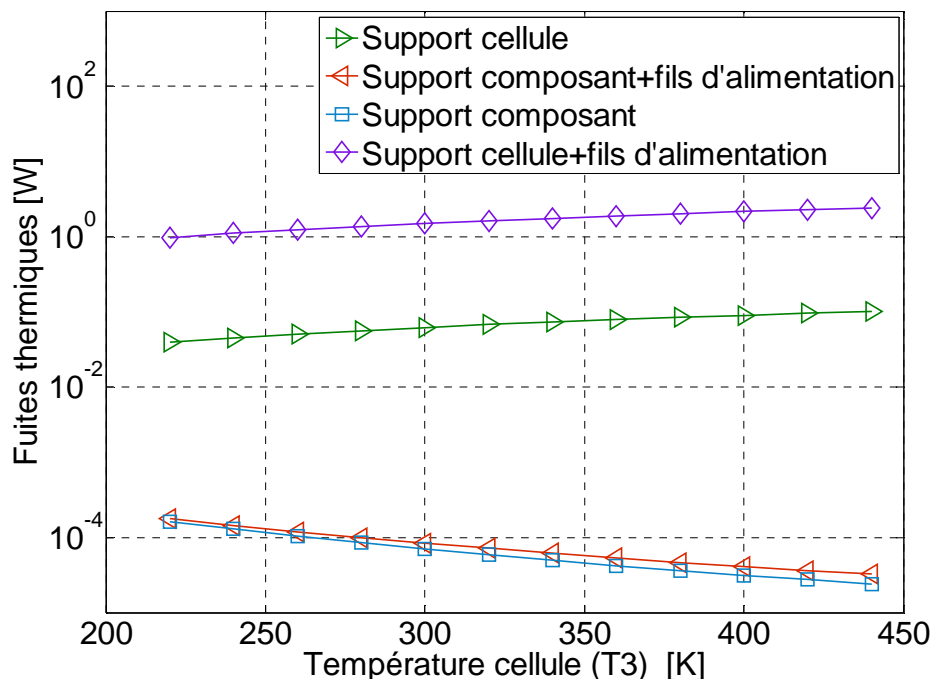


Figure 54 : Evolution des fuites thermiques dans les différents supports et amenées de courant en fonction de la température de la cellule (T_3). Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle

Les fuites sont plus importantes à l'extérieur de la cellule de mesure qu'à l'intérieur, ceci s'explique par un écart de température important entre les deux extrémités des amenées de courant et du support de la cellule. La courbe marquée par des losanges montre que les fuites à travers le support de la cellule évoluent peu et restent faibles devant les fuites dues aux amenées de courant entre la cellule et le réservoir d'azote liquide.

En revanche, les fuites à travers le support et les amenées de courant du composant situé à l'intérieur de la cellule sont beaucoup plus faibles. Cela s'explique par la faible valeur de l'écart de température entre le composant et la cellule de mesure. Aussi, à l'opposé des amenées de courant situées à l'extérieur de la cellule qui sont en cuivre, celles du composant sont en constantan et donc dans un matériau moins bon conducteur thermique.

2.7.2. Profil de la température dans l'amenée de courant

Le profil de température dans l'amenée de courant, à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule, est observé afin d'évaluer les déperditions thermiques par conduction dans ces constituants.

i. Intérieur de la cellule

La présence d'un courant dans les fils électriques d'alimentation du composant contribue à la génération d'un flux thermique par effet Joule. Ce flux thermique est capté par la cellule de mesure et il constitue la principale source d'erreur du calorimètre.

L'équation générale de la conduction thermique est appliquée à une amenée de courant afin d'observer le profil de la température en son sein, lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. Dans cette simulation, le régime thermique est considéré comme stationnaire, et la résolution de l'équation est effectuée dans le cas unidimensionnel.

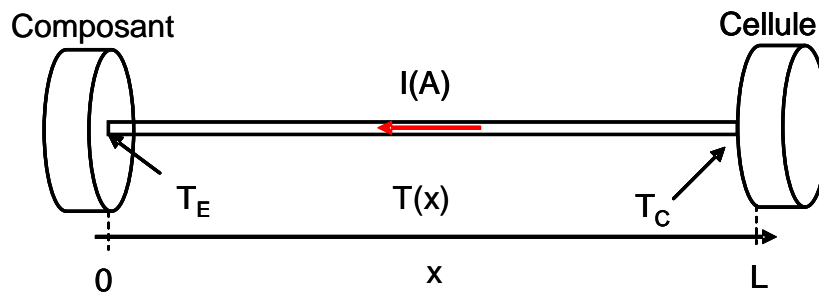


Figure 55 : Représentation des éléments pour la modélisation des échanges de chaleur à travers une amenée de courant reliant le composant à la cellule de mesure. $I(A)$ représente le courant électrique d'alimentation du composant

Ainsi, l'évolution de la température dans une amenée de courant est solution de l'équation (134).

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{P}{k} = 0 \quad (134)$$

où k est la conductivité thermique de l'amenée de courant, P est sa génération volumique de puissance, $T(x)$ est le profil de température et x l'abscisse (Figure 55)

En négligeant le rayonnement du composant sur l'amenée de courant, la génération de puissance volumique P s'écrit (135).

$$P = \rho \cdot J^2 - \frac{4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_2^4)}{D} \quad (135)$$

ρ est la résistivité électrique de l'amenée de courant ; J est sa densité de courant ; D est son diamètre ($D = 1,12 \cdot 10^{-3}$ m) ; σ est la constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W m⁻²K⁻⁴) ; ε est l'émissivité de la surface de l'amenée de courant peinte en noir avec la peinture Nextel Velvet® ($\varepsilon = 0,97$) et T_2 est la température de la cellule de mesure. Les relations (134) et (135) sont résolues numériquement sur Wolfram Mathematica®.

Les conditions aux limites sont celles des températures imposées par la cellule de mesure et par le composant (Figure 55) : $x=0$; $T(x = 0) = T_1$ et $x = L$; $T(x = L) = T_2$.

L'écart de température entre la cellule de mesure et le composant ne dépasse pas 2 °C (Figure 52), cependant le plus important ici est de faire une confrontation des fuites par conduction dans le cuivre et dans le constantan. La résolution de l'équation (134) est donc effectuée pour ces deux matériaux avec $L = 0,11$ m de longueur et $D = 1,12$ mm de diamètre. Le courant dans les fils est fixé à 100 mA ($J = 0.1 \text{ A mm}^{-2}$) puisque le courant dans les composants est faible, et les températures T_1 et T_2 sont respectivement fixées à 302 K et 300 K.

La Figure 56 présente le profil de température dans l'amenée de courant donnée par (134), pour le cuivre et le constantan.

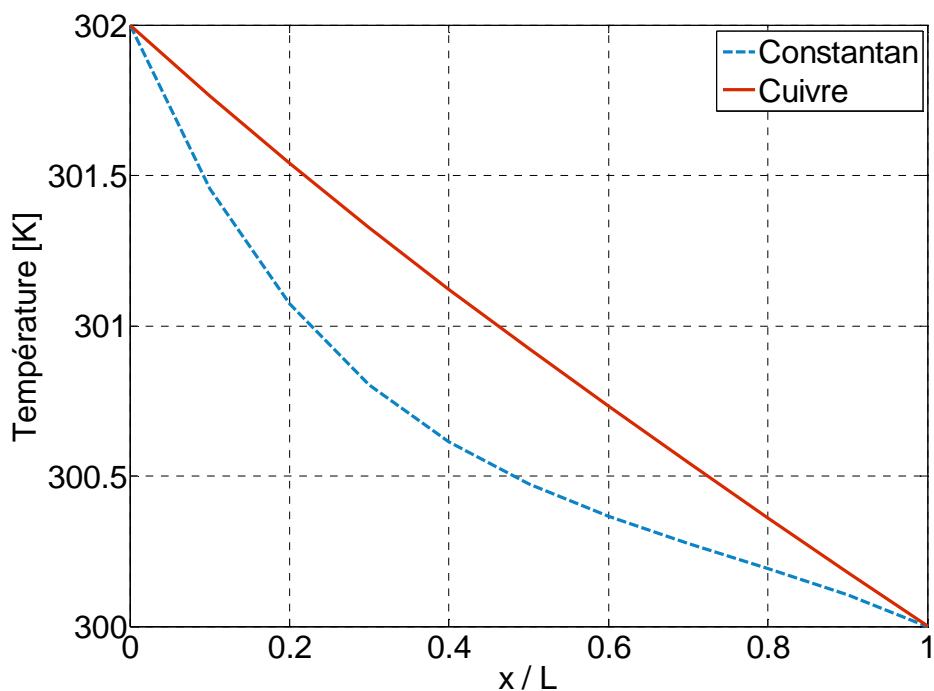


Figure 56 : Profil spatial de température dans l'amenée de courant en cuivre ou en constantan

Pour le cas du cuivre, le profil de température est quasiment linéaire. Cette évolution implique une prépondérance de la conduction thermique par rapport au rayonnement du fil.

En effet, le nombre de Biot correspondant au cuivre pour les conditions aux limites imposées précédemment, est calculé à partir de l'équation (136).

$$Bi = \frac{4\varepsilon\sigma T_m^3 L}{k} \quad (136)$$

où T_m est la température moyenne de l'amenée de courant supposé égale à 301K. Bi est égal à $1,7 \cdot 10^{-3}$, cette valeur confirme donc la prépondérance de la conduction sur le rayonnement.

En conséquence, le flux évacué par conduction est susceptible de créer un point chaud, au point de contact entre le fil et la cellule de mesure conduisant ainsi à des inhomogénéités en température sur la cellule.

Quant au constantan, le profil de température présente une décroissance plus importante que celle du cuivre, de telle sorte que le profil de température de ce matériau est non linéaire. Le gradient thermique est important à $x / L = 0$, puis il diminue en fonction de x / L et devient plus faible par rapport à celui du cuivre à $x / L = 1$. Le nombre de Biot Bi correspondant au constantan est égal à $3 \cdot 10^{-2}$, il est donc 18 fois plus important que celui du cuivre. La dissipation du flux de chaleur par rayonnement est donc beaucoup plus favorable avec le constantan qu'avec le cuivre.

Aussi, la Figure 57 présente le profil des fuites thermiques par conduction dans l'amenée de courant. Le calcul est effectué en dérivant le profil de température par rapport à l'abscisse x et en multipliant le tout par $-kA$, où k est la conductivité thermique du matériau considéré et A est la section du fil.

Les fuites par conduction dans le cuivre restent beaucoup plus importantes que dans le constantan. En revanche ces fuites restent inférieures à 0,7 mW dans les deux cas, elles sont donc faibles pour des faibles courants inférieurs à 100 mA.

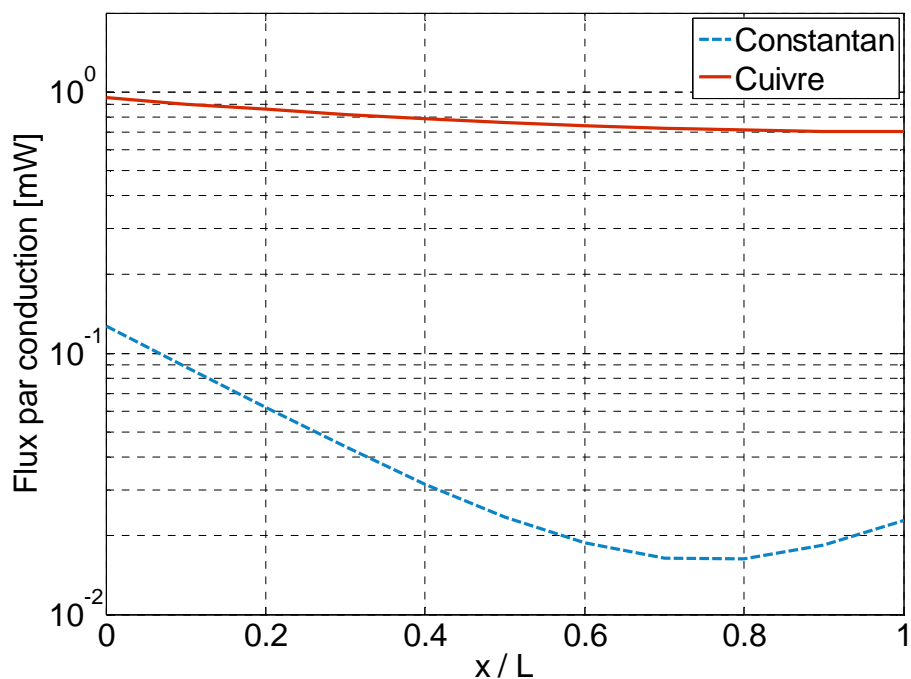


Figure 57 : Flux transmis par conduction ($-k \cdot A \cdot dT/dx$, $A = \pi D^2/4$) en différents points de l'amenée de courant considérée en cuivre ou en constantan

Ainsi, l'utilisation du constantan comme matériau d'amenée de courant est une solution qui permet de favoriser l'homogénéisation en température de la cellule de mesure et de limiter les fuites par conduction.

ii. Extérieur de la cellule

D'après le paragraphe précédent, il est clair que dans les amenées de courant, le rayonnement est favorisé avec le constantan.

Pour le principe de mesure du calorimètre, il est nécessaire que les conditions de température avant et pendant l'alimentation électrique du composant testé soient identiques à l'extérieur de la cellule de mesure. Le conducteur en cuivre présente un effet Joule moins important que celui du constantan et son profil de température est linéaire. Ainsi, il permet donc de limiter les perturbations à l'extérieur de la cellule de mesure. En conséquence, les amenées de courant à l'extérieur de la cellule de mesure sont en cuivre.

2.8. Sensibilité et performances prévues par la modélisation

Un calcul a permis d'évaluer la variation de température causée par une génération de puissance thermique dans le composant, sur la cellule de mesure initialement maintenue à une température donnée.

La Figure 58 présente l'évolution de cette variation de température en fonction de la température initiale de la cellule lorsque la puissance générée prend des valeurs de 0,1 mW, 1 mW et 10 mW.

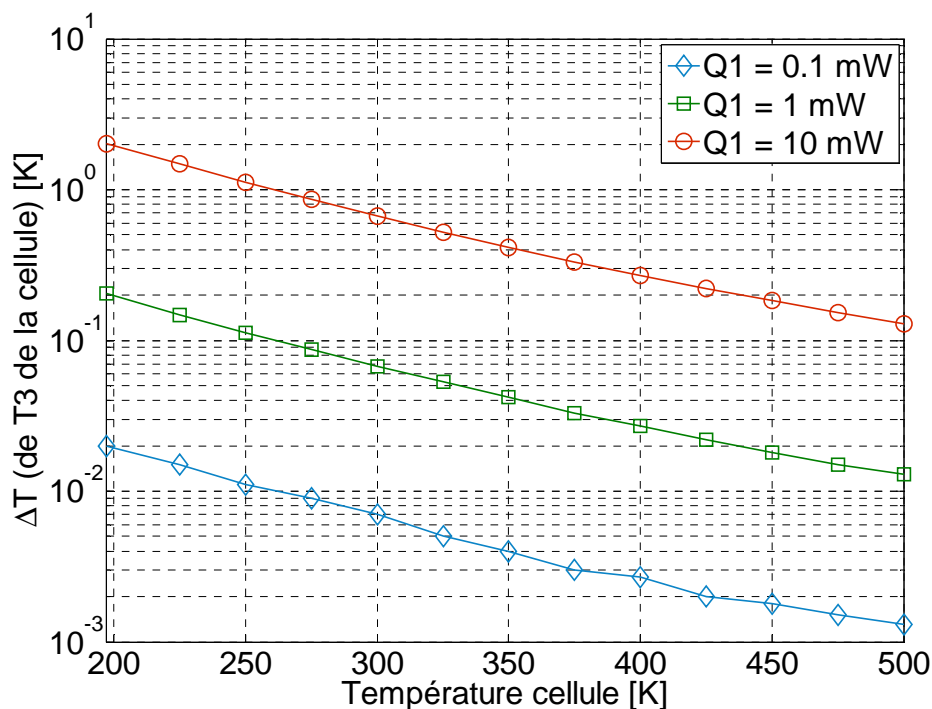


Figure 58 : Evolution de la différence de température de la cellule ΔT entre les états actif et inactif du composant en fonction de la température initiale de la cellule. La température de la cellule est réglée pour chaque état du composant

Dans tous les cas, la variation de la température ΔT diminue lorsque la température initiale de la cellule de mesure augmente. En revanche, cette variation s'accroît lorsque la chaleur générée dans le composant testé augmente.

Le Tableau 10 montre les valeurs prises par ΔT à 200 K et à 500 K, qui sont des températures aux extrémités de la plage de mesure. Les variations correspondant à ces températures représentent respectivement le maximum et le minimum de ΔT pour une puissance générée dans le composant, donnée.

Puissance générée par composant Q_1 [mW]	ΔT_{cell} [K] à $T_{cellule}$ initiale = 200 K	$\Delta T_{cellule}$ [K] à $T_{cellule}$ initiale = 500 K
0,1	0,02	0,0013
1	0,204	0,013
10	2,019	0,128

Tableau 10 : Ecarts de température engendrés sur la cellule par une génération de puissance Q_1 du composant pour deux températures initiales (i.e. extrémité de la plage) de la cellule de mesure

Ainsi, pour une puissance générée de 0,1 mW la variation ΔT à 200 K est de 20 mK. Cette variation est de 1,3 mK à 500 K.

La mesure d'une puissance de 0,1 mW pour une température de 500 K imposée à la cellule de mesure nécessite donc des instruments à haute résolution de l'ordre du 1 mK, ce qui nous a conduit à choisir un régulateur de température qui réalise ces performances. Nos capteurs Pt100 semblent également avoir une sensibilité de cet ordre lorsqu'elles sont étalonnées dans les conditions expérimentales de mesure. Les mesures expérimentales permettront de fixer avec certitude la puissance minimale mesurable par notre calorimètre.

Les calculs effectués dans notre modèle analytique des échanges de chaleur sont limités au simple régime thermique stationnaire. Il est nécessaire d'analyser la dynamique thermique du calorimètre afin de pouvoir apprécier les constantes de temps de chaque élément du dispositif.

3. Dynamique thermique du calorimètre

Pour apprécier la dynamique thermique du calorimètre lors de la phase de refroidissement après remplissage du réservoir d'azote liquide, nous avons ajouté dans chaque équation du modèle, un terme lié à la capacité thermique de chaque élément. Ainsi, nous avons obtenu un système d'équation du type refroidissement newtonien. Ces équations sont réécrites ci-après : (seuls les termes non définis au Chapitre III seront explicités ici, pour plus de détail sur les équations, consulter le Chapitre III au paragraphe 3.4).

$$\mathfrak{S}_{1,2}\sigma(T_1^4 - T_2^4) + (T_1 - T_2) \times \left(\frac{1}{R_{TH1}} + \frac{1}{R_{TH1S}} \right) - Q_1 + V_1 \rho_{Cu} C_{p_{Cu}} \frac{dT_1}{dt} = 0 \quad (137)$$

$$T_2 - T_3 = 0 \quad (138)$$

$$Q_1 + Q_3 + \frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,EI}} + \frac{\sigma(T_H^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,H}} + (T_0 - T_3) \times \left(\frac{2}{R_{TH3}} + \frac{1}{R_{TH3S}} \right) - V_3 \rho_{Cu} C_{p_{Cu}} \frac{dT_3}{dt} = 0 \quad (139)$$

$$\frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,EI}} + \frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_H^4)}{\mathfrak{R}_{H,EI}} + \mathfrak{S}_{EI,VI} \sigma(T_{EI}^4 - T_{VI}^4) + \frac{T_{EI} - T_{VI}}{R_{THEI,VI}} + \frac{T_{EI} - T_{ES}}{R_{THE,E}} + V_{EI} \rho_{Cu} C_{p_{Cu}} \frac{dT_{EI}}{dt} = 0 \quad (140)$$

$$\Phi_{ES} + \mathfrak{S}_{ES,VS} \sigma(T_{ES}^4 - T_{VS}^4) + \frac{T_{ES} - T_{VS}}{R_{THES,VS}} + \frac{T_{ES} - T_{EI}}{R_{THE,E}} + V_{ES} \rho_{Cu} C_{p_{Cu}} \frac{dT_{ES}}{dt} = 0 \quad (141)$$

$$\Phi_H + \frac{\sigma(T_H^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,EI}} + \frac{\sigma(T_H^4 - T_{EI}^4)}{\mathfrak{R}_{H,EI}} + \frac{T_H - T_0}{R_{TH0,H}} + \frac{T_H - T_3}{R_{TH3,H}} + V_H \rho_{In} C_{p_{In}} \frac{dT_H}{dt} = 0 \quad (142)$$

$$\mathfrak{S}_{ES,VS} \sigma(T_{ES}^4 - T_{VS}^4) + \frac{T_{ES} - T_{VS}}{R_{THES,VS}} + \frac{T_{VI} - T_{VS}}{R_{THV,V}} + \frac{T_S - T_{VS}}{R_{THS,VS}} + \frac{T_C - T_{VS}}{R_{THVS,C}} + \frac{T_P - T_{VS}}{R_{THV,P}} - V_{VS} \rho_{In} C_{p_{In}} \frac{dT_{VS}}{dt} = 0 \quad (143)$$

$$\mathfrak{S}_{EI,VI} \sigma(T_{EI}^4 - T_{VI}^4) + \frac{T_{EI} - T_{VI}}{R_{THE,VI}} + \frac{T_{VS} - T_{VI}}{R_{THV,VI}} + (T_I - T_{VI}) \times \left(\frac{1}{R_{THV,SI}} + \frac{1}{R_{TH4}} + \frac{1}{R_{TH5}} + \frac{1}{R_{TH6}} \right) - V_{VI} \rho_{In} C_{p_{In}} \frac{dT_{VI}}{dt} = 0 \quad (144)$$

$$\Phi_C + \mathfrak{S}_{C,a} \sigma(T_a^4 - T_C^4) + (T_0 - T_C) \times \left(\frac{1}{R_{TH0,C}} + \frac{2}{R_{TH0}} \right) + \frac{T_{VS} - T_C}{R_{THC,V}} + h_C \times S_C \times (T_a - T_C) - V_C \rho_{In} C_{p_{In}} \frac{dT_C}{dt} = 0 \quad (145)$$

$$\frac{T_{VS} - T_P}{R_{THP,V}} + \mathfrak{S}_{P,a} \sigma(T_a^4 - T_P^4) + h_P S_P (T_a - T_P) - V_P \rho_{In} C_{p_{In}} \frac{dT_P}{dt} = 0 \quad (146)$$

$$\frac{T_{VS} - T_S}{R_{THS,VS}} + \mathfrak{S}_{S,a} \sigma(T_a^4 - T_S^4) + h_S S_S (T_a - T_S) = 0 \quad (147)$$

$$\mathfrak{S}_{I,a} \sigma(T_a^4 - T_I^4) + (T_{VI} - T_I) \times \left(\frac{1}{R_{THVSI}} + \frac{1}{R_{TH4}} + \frac{1}{R_{TH5}} + \frac{1}{R_{TH6}} \right) + h_I S_I (T_a - T_I) = 0 \quad (148)$$

où ρ_{Cu} et ρ_{In} sont respectivement les masses volumiques du cuivre et de l'acier inoxydable 304L considérées comme étant indépendantes de la température ($\rho_{Cu} = 8870 \text{ kg m}^{-3}$ et $\rho_{In} = 7850 \text{ kg m}^{-3}$). $C_{p_{Cu}}$ et $C_{p_{In}}$ sont les chaleurs spécifiques à pression constante du cuivre et de l'acier inoxydable considérées également comme des constantes ($C_{p_{Cu}} = 385 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et $C_{p_{In}} = 477 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Les V_i sont les volumes des constituants considérés ($V_1 = 1,79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$; $V_3 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; $V_H = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$; $V_{ES} = 3,74 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; $V_{EI} = 4,27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; $V_{VS} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; $V_{VI} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; $V_C = 6,16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; $V_P = 3,97 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$) et t est l'abscisse temporelle.

Le refroidissement newtonien étant non applicable au Styrodur® ($k = 0,034 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) puisque le nombre de Biot de cet élément est de $Bi = hL/k = 12,6 \gg 1$ (le coefficient d'échange de l'enceinte calorimétrique avec l'air est donné par $h = 1,78 \Delta T^{0,25}$, [Brau2006] et L est d'environ $0,24 \text{ m}$). Dans nos calculs, le régime thermique dans le Styrodur® est considéré comme stationnaire. Cette hypothèse permet de travailler dans un cas où la capacité thermique du Styrodur® n'intervient pas dans les calculs et permet donc de travailler dans le pire des cas.

La Figure 59 montre l'évolution des températures du système lorsque le support de la cellule de mesure au réservoir d'azote est en époxy fibre de verre.

On observe que le régime thermique stationnaire est très long à atteindre. La descente en température de l'écran H est logiquement plus rapide que les autres éléments du système. Cependant, la cellule de mesure présente une dynamique beaucoup trop faible. Ainsi, pour atteindre une température de 247 K (-26 °C), il faut attendre 100 heures en théorie lorsque le support d'accrochage de la cellule de mesure est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre.

Cette dynamique très lente de la température pourrait avoir pour conséquence la diminution de la gamme de température de mesure du système. Une solution serait d'envisager des supports de nature différente (ex. l'inox, l'aluminium et ou le cuivre).

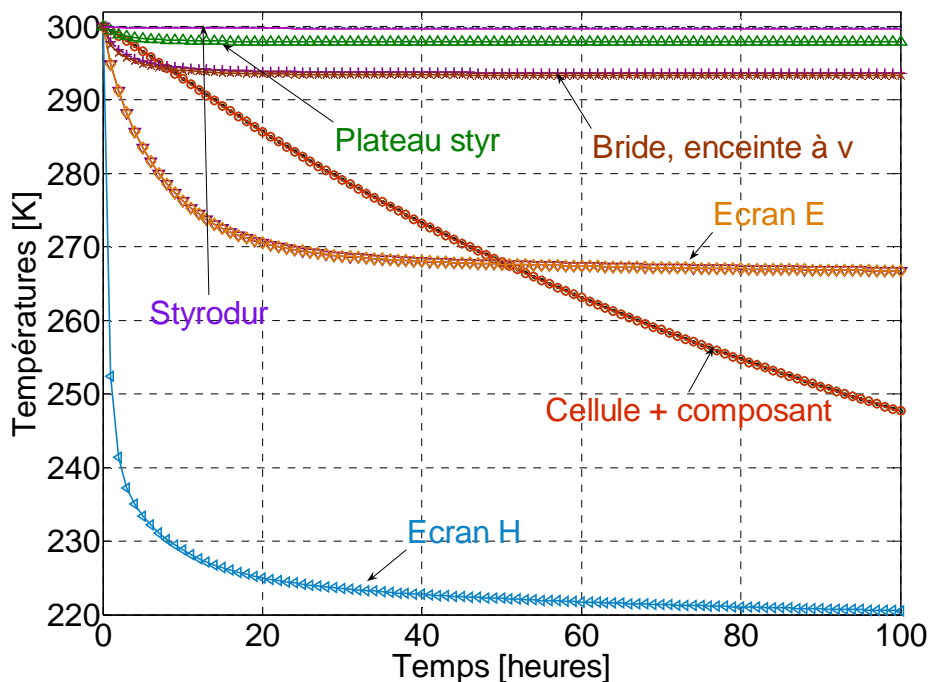


Figure 59 : Evolution temporelle de température des principaux éléments du calorimètre en l'absence de génération de puissance ($Q_1 = Q_3 = 0$). Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre

La Figure 60 présente le refroidissement de la cellule de mesure pour différents matériaux constitutifs de son support au réservoir d'azote.

Le calcul de ces températures est réalisé avec des conductivités thermiques constantes de l'époxy fibre de verre, de l'acier inoxydable, de l'aluminium et du cuivre, respectivement égales à $0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $237 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, et $392 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Plus le matériau du support de la cellule est conducteur plus la descente de la température de la cellule de mesure est rapide. On peut donc gagner du temps pour refroidir la cellule de mesure avec un support constitué d'un matériau bon conducteur thermique. Cependant, il est nécessaire d'éviter les gradients thermiques sur la cellule, cette dernière étant conçue comme isotherme. L'expérience nous permettra de choisir le matériau adéquat.

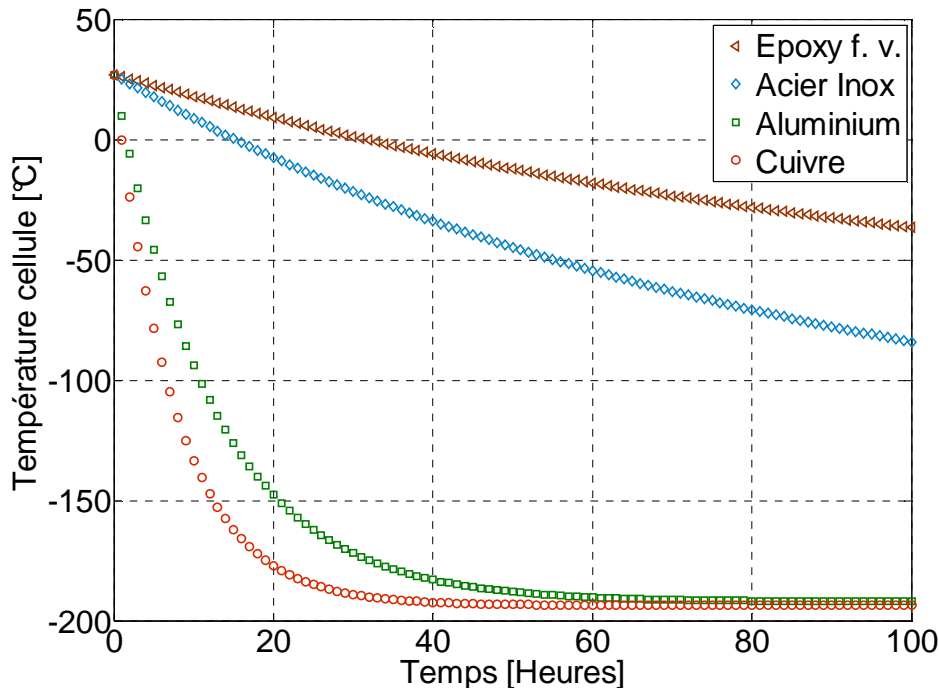


Figure 60 : Evolution temporelle de température de la cellule en l'absence de génération de puissance ($Q_1 = Q_3 = 0$) pour différents matériaux constituant son support d'accrochage au réservoir d'azote

4. Conclusion

Le flux thermique entrant dans le calorimètre évalué par la modélisation est de 5 W à une température de 300 K, sa variation en fonction de la température du milieu extérieur est de $57,2 \text{ mW K}^{-1}$. Sur la cellule de mesure, la variation de la température du milieu extérieur au calorimètre conduit à une variation de flux thermique de $2,9 \text{ mW K}^{-1}$. Il apparaît comme nécessaire que le flux thermique entrant demeure constant durant les mesures. Une solution à ce problème est de travailler dans les conditions de température extérieure fixée.

Aussi, l'évolution des températures du calorimètre en fonction de la puissance calorifique fournie par la régulation sur la cellule de mesure montre que la température de cette dernière est très sensible à cette puissance. Le chauffage de la cellule n'influence pas le milieu extérieur puisque la température des parois extérieures du calorimètre reste quasiment constante lorsque celle de la cellule augmente.

Le principe de mesure du calorimètre est basé sur un échange de chaleur par rayonnement. Les fuites thermiques par conduction à travers les amenées de courant et le support du composant contribuent à la limitation du rayonnement émis par ce dernier. Les simulations ont montrés que l'on pouvait cependant atteindre des ratios de flux rayonné sur flux total généré dans le composant allant de 99,8% à 99,95% avec le constantan. Ces valeurs de ratio sont obtenues à condition d'avoir des valeurs importantes d'émissivité de la surface du composant et de la surface interne de la cellule de mesure. La peinture Nextel Velvet Coating 811-21 est une solution intéressante à ce problème.

La génération de puissance thermique due à la présence d'un courant électrique dans les amenées de courant constitue la principale source d'erreur du calorimètre. Nous avons observé par simulation le profil de température dans une amenée de courant en cuivre et en constantan en présence d'un courant électrique. Cette simulation montre une meilleure dissipation du flux thermique par rayonnement dans le constantan, cette meilleure dissipation étant favorable à notre principe de mesure.

Notre modèle montre qu'un échauffement de 0,1 mW est mesurable en théorie par des instruments ayant une résolution de l'ordre de 1 mK. Expérimentalement, la mesure d'un échauffement générée par un composant à une température imposée sur la cellule de mesure n'est possible que si la puissance de régulation fournie à la cellule est supérieure à la puissance que l'on souhaite mesurer.

Des calculs en régime transitoire ont également été réalisés afin de pouvoir apprécier les dynamiques thermiques de chaque constituant du dispositif calorimétrique. Ainsi, on observe que le refroidissement de la cellule de mesure présente une dynamique lente lorsque son support est constitué d'un matériau thermiquement résistif. Il apparaît que cette dynamique peut être améliorée en utilisant pour ce support de la cellule, des matériaux de meilleures conductivités thermiques. La principale contrainte sur le matériau du support de la cellule est de limiter les gradients thermiques sur la cellule afin que cette dernière reste homogène. L'expérimentation avec divers matériaux permettra de dégager le meilleur compromis, entre un refroidissement rapide de la cellule et une limitation des gradients sur cette dernière.

5. References

[Brau2006] J. Brau, "Convection", INSA de Lyon, Département de Génie Civil et Urbanisme, 2006.

[Hameury2005] J. Hameury, B. Hay, and J. R. Filtz, "Measurement of Infrared Spectral Directional Hemispherical Reflectance and Emissivity at BNM-LNE" in *International Journal of Thermophysics*, Vol.26, No.6, pp.1973–1983 November 2005.

[Ogarev2009] S. Ogarev, M. Samoylov, V. Sapritsky, A. Panfilov, "Low-Temperature Blackbodies for IR Calibrations in a Medium-Background Environment", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 30, pp. 77-97, Feb, 2009.

[Seguin1997] B. Seguin, J. P. Gosse, "Dispositif de mesure calorimétrique des pertes dans les condensateurs de puissance", *Journal de Physique III France*, vol.7, pp.321-336, 1997.

[Tang-Kwor2001] Eric Tang-Kwor, Simone Matteï "Emissivity measurements for Nextel Velvet Coating 811-21 between -36 °C and 82 °C", *High Temperatures - High Pressures*, Vol.33, Issue5, pp.551–556, 2001.

Chapitre V Essais et validation

6. Introduction

Le travail mené au cours des deux précédents chapitres a montré qu'un tel dispositif était théoriquement envisageable. Ces travaux reposent cependant sur des hypothèses, qui nécessitent d'être vérifiées par la pratique.

Ce dernier chapitre présente donc les principaux résultats permettant de valider le bon fonctionnement du dispositif. Nous avons notamment étudié les réponses en régime stationnaire et transitoire des sondes de température. Nous avons ensuite surveillé le comportement thermique de la cellule de mesure avec et sans régulation mais aussi en fonction des différents matériaux constituant le support d'accrochage. Nous avons par ailleurs étudié les gradients de températures dans la cellule, sur l'écran thermique vertical E et sur l'enceinte à vide. Nous avons enfin obtenu les caractéristiques les plus importantes de ce mémoire permettant de valider le bon fonctionnement du dispositif, à savoir : la précision et l'étendue de mesure.

7. Précision des températures mesurées

7.1. Comportement en régime permanent

Un premier essai a été réalisé à la température de référence T_{ref} dite de l'azote liquide. Nous avons plongé simultanément 6 sondes de platine (référéncées F1, F2, F3, M1, M2 et M3) dans un vase de Dewar préalablement rempli d'azote liquide. Nous avons enregistré au cours du temps la température issue de chacune de ces sondes. Les valeurs reportées dans le Tableau 11 ont été obtenues une fois que le régime permanent semblait atteint.

Un deuxième essai a été réalisé après collage des sondes sur les deux demi-sphères. La cellule a été placée dans l'enceinte calorimétrique, elle est suspendue au réservoir d'azote à l'aide d'un support en époxy fibre de verre. Un vide secondaire de 5.10^{-6} mbar est ensuite réalisé dans l'enceinte à vide. De la même façon que dans l'expérience précédente, nous avons reporté dans le Tableau 11 les températures une fois que le régime permanent semblait atteint. Nous avons pris comme référence arbitraire, la température issue d'un thermocouple de type K collé en un point de la sphère, i.e. $T_{ref}=18^{\circ}\text{C}$.

Références des sondes	$T_{ref} = -196^{\circ}\text{C}$ (Azote liquide)			$T_{ref} = 18^{\circ}\text{C}$ (Cuivre massif)		
	T_{mes} [$^{\circ}\text{C}$]	ϵ_a [$^{\circ}\text{C}$]	ϵ_r [%]	T_{mes} [$^{\circ}\text{C}$]	ϵ_a [$^{\circ}\text{C}$]	ϵ_r [%]
1 (M1)	-195,9000	0,1000	5.10^{-4}	17,9380	0,0620	3.10^{-4}
2 (M2)	-195,8920	0,1080	5.10^{-4}	17,8900	0,1100	7.10^{-4}
3 (M3)	-195,8500	0,1500	7.10^{-4}	17,9100	0,0900	5.10^{-4}
4 (F1)	-195,8530	0,1470	7.10^{-4}	17,9830	0,0170	9.10^{-4}
5 (F2)	-195,8800	0,1200	6.10^{-4}	17,9100	0,0900	5.10^{-4}
6 (F3)	-195,8900	0,1100	7.10^{-4}	17,9200	0,0800	4.10^{-4}

Tableau 11 : Températures mesurées T_{mes} à partir des sondes Pt100 suivant deux températures de références T_{ref} . Ces mesures ont été réalisées en régime permanent. On en a déduit les erreurs : absolue ϵ_a et relative ϵ_r .

Dans ces deux essais (Tableau 11), on observe que le plus grand écart à la température de référence est de 0,15°C. Cependant ces essais ne constituent pas un étalonnage au sens métrologique du terme. Nous nous contenterons donc de relever la disparité entre les températures obtenues. Ainsi nous observons que l'écart maximum des températures entre deux sondes est de 0,05 °C. Cette valeur est donc inférieure à l'erreur systématique habituellement donnée pour une sonde de classe 1/3DIN B suivant la norme EN 60 751 : i.e. $\epsilon_a = \pm 0,1$ °C au voisinage de $T=0$ °C. Cette valeur est cependant non négligeable eu égard aux gradients de températures que nous espérons évaluer. Il s'agira donc de prendre en compte cette valeur afin d'analyser correctement les résultats qui seront présentés ci-après.

Notons enfin que des essais complémentaires dans les conditions requises nous auraient permis de caractériser d'avantage ces sondes et leur conditionneur. Nous avons réalisé des tests aux températures de la glace fondante et d'ébullition de l'eau. Cependant, ces mesures n'étant pas réalisées dans les conditions exigées pour ce type d'expérience, les résultats obtenus ont montré des écarts de température entre les sondes, supérieurs à leur tolérance (qui est de $\pm 0,1$ °C à 0 °C). Des essais plus soignés auraient donc permis d'affiner les caractéristiques métrologiques de ces capteurs Pt100. Nous pensons en particulier au distinguo important qu'il eût été nécessaire de faire entre erreur aléatoire et erreur systématique.

7.2. Comportement en régime transitoire

Un troisième essai a été réalisé sur la base des deux demi-sphères en cuivre massif. Dans un premier temps, la sphère placée dans le calorimètre a été suspendue au réservoir d'azote avec un support d'accrochage en matériau composite fait d'époxy et fibres de verre. Puis, le calorimètre a été mis sous vide secondaire. Nous avons ensuite rempli le réservoir d'azote liquide en enregistrant au fil du temps l'évolution des températures (Tableau 12) issues des sondes F1, F2, M1 et M2.

Références des sondes	Tref F1 =17,7882 °C à t=30 min			Tref F1 =17,4324 °C à t=60 min		
	Tmes [°C]	ϵ_a [°C]	ϵ_r [%]	Tmes [°C]	ϵ_a [°C]	ϵ_r [%]
1 (M1)	17,7444	0,0438	$25 \cdot 10^{-4}$	17,3828	0,0496	$28 \cdot 10^{-4}$
2 (M2)	17,7238	0,0644	$36 \cdot 10^{-4}$	17,3889	0,0435	$25 \cdot 10^{-4}$
4 (F1)	17,7882	0,0000	$0 \cdot 10^{-4}$	17,4324	0,0000	$0 \cdot 10^{-4}$
5 (F2)	17,7778	0,0104	$58 \cdot 10^{-4}$	17,4255	0,0069	$4 \cdot 10^{-4}$

Tableau 12 : Températures mesurées Tmes à partir de sondes Pt100 suivant une température de références Tref décroissante au fil du temps. Ces mesures ont été réalisées en régime transitoire. On en a déduit les erreurs : absolue ϵ_a et relative ϵ_r à intervalle de temps régulier

Dans ce troisième essai (Tableau 12), nous observons que l'écart maximum des températures entre deux sondes est de 0,06 °C. De même qu'en régime permanent, cette valeur inférieure à l'erreur systématique habituellement donnée pour une sonde de classe 1/3DIN B suivant la norme EN 60 751 : i.e. $\epsilon_a = \pm 0,1$ °C aux environs de $T=0$ °C.

8. Réponse thermique de la cellule de mesure

8.1. Réponse thermique sans régulation

Dans cette expérience, la cellule de mesure est raccordée au réservoir d'azote par l'intermédiaire d'un support en époxy fibre de verre et placée sous un vide secondaire. Nous avons enregistré l'évolution de la température de la cellule immédiatement après le remplissage du réservoir d'azote liquide (Figure 61). Le système de régulation est maintenu inactif pour le besoin de l'expérience.

La courbe obtenue présente une dynamique relativement lente. Ainsi pour atteindre une température de -20 °C , il faut attendre plus de 50 heures (et nous sommes loin de pouvoir considérer ce régime comme permanent). Ce résultat donne une première idée de la durée des expériences. Nous remarquons en particulier que les expériences qui seront menées vers les basses températures demanderont des temps de refroidissement très long.

Nous proposons dans cette même Figure 61, de comparer la réponse thermique de la cellule à celle prévue par la modélisation théorique en régime transitoire (§ 3 du Chapitre IV).

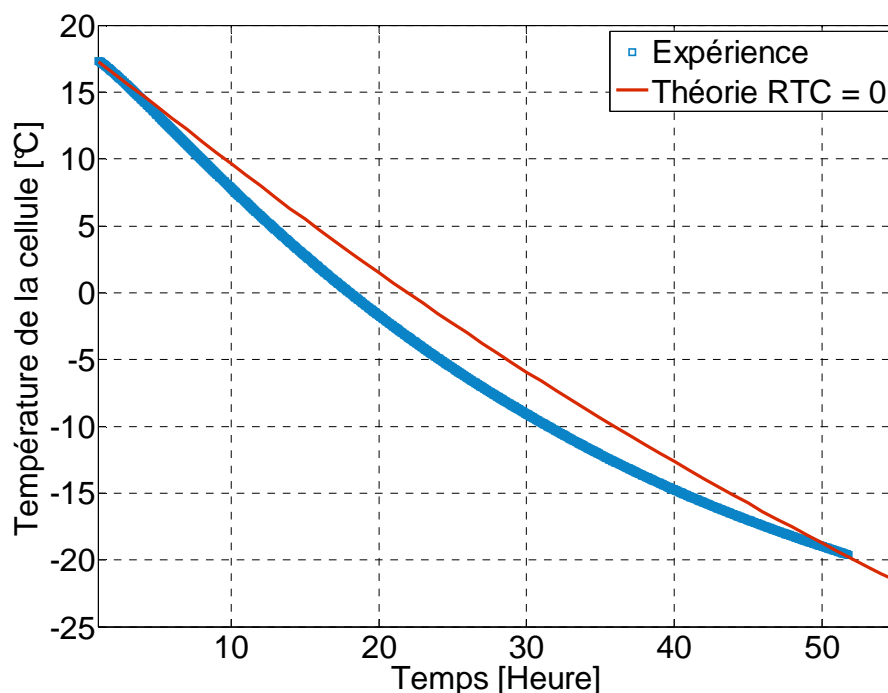


Figure 61 : Evolutions de la température de la cellule, à la suite du remplissage du réservoir d'azote. La régulation est inactive et le composant est absent de la cellule. La température est mesurée par la sonde F1. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre. La cellule est placée sous un vide secondaire. Cette évolution est mise en comparaison avec la réponse théorique de la température de la cellule qui ne tient pas compte des résistances thermiques de contact (RTC = 0)

Aux temps courts, on observe que la variation de température est plus importante dans l'expérience qu'en théorie. Au temps long ($> 55\text{ h}$) on observe que cette tendance s'inverse. Mais l'on peut remarquer que la tendance globale et les ordres de grandeurs en termes de temps de réponse concordent approximativement avec la théorie.

Cependant, l'écart entre les réponses théorique et expérimentale révèle le caractère trop simpliste de notre modèle. Nous n'avons en effet pas pris en compte les résistances thermiques de contact (RTC) entre la cellule et le support d'accrochage et entre le support d'accrochage et le réservoir d'azote. De plus, nous avons négligé la variation d'énergie interne du support d'accrochage de la cellule de mesure.

Afin de vérifier si cette explication est valable, nous avons cherché à observer l'influence des résistances de contact sur la réponse théorique de la cellule. Pour ce faire, nous nous sommes placés dans le cas d'un support d'accrochage de la cellule en cuivre ce qui nous permet d'être en cohérence avec les hypothèses ci-dessus. Nous proposons donc sur la Figure 62 les résultats de cette simulation en ayant considéré trois résistances thermiques de contact globales indépendantes de la température, à savoir : $RTC=100 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$, $80 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ et $60 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$.

On observe qu'en dessous d'une durée de 25 heures de refroidissement, la courbe expérimentale est sensiblement corrélée avec la théorie lorsque l'on considère une résistance thermique de contact de $80 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$. Au-delà de cette durée, ces deux courbes deviennent très distinctes. Puis, la courbe théorique correspondant à une résistance thermique de contact de $100 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ se rapproche de la courbe expérimentale.

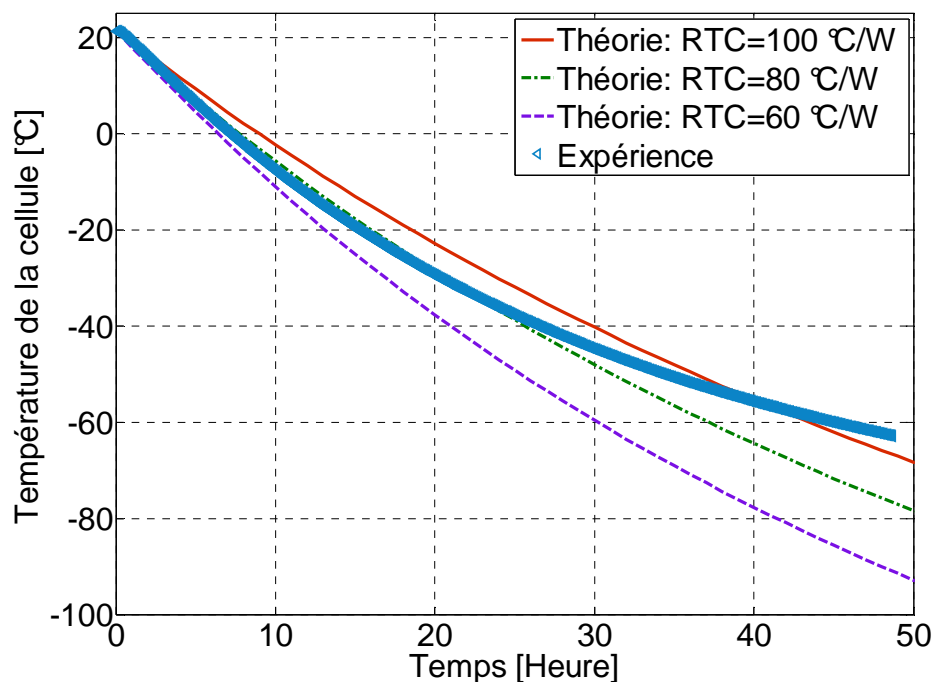


Figure 62 : Evolutions de la température de la cellule, à la suite du remplissage du réservoir d'azote. La régulation et le composant sont inactifs. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. Le support d'accrochage de la cellule est en cuivre. La cellule est placée sous un vide secondaire. Cette évolution est mise en comparaison avec les réponses théoriques de la température de la cellule pour différentes valeurs de la résistance thermique de contact globale entre la cellule et le réservoir d'azote

La résistance de contact semble donc jouer un rôle non négligeable sur la réponse thermique de la cellule. Elle constituerait donc une explication probable de l'écart observé entre la théorie et la pratique. Cependant, il semble nécessaire de

prendre en compte le caractère non constant de cette résistance thermique de contact.

Au-delà de la comparaison entre pratique et expérience, le résultat le plus important est le temps de réponse caractéristique de la cellule. Comme nous l'avons souligné précédemment ce temps est non négligeable et rallonge considérablement la durée de l'expérience au voisinage des basses températures. Nous avons donc cherché à agir sur la durée de refroidissement de la cellule de mesure. Pour ce faire nous avons réalisé quatre supports d'accrochage de la cellule au réservoir avec différents matériaux (Tableau 13). Les matériaux utilisés en plus de l'époxy fibre de verre sont respectivement l'acier inoxydable 304 L, l'aluminium 6060 et le cuivre Cu-b1. La Figure 63 regroupe les différentes réponses en température de la cellule en fonction des différents types de matériaux constituant le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote.

Matériaux	Conductivités thermique [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Epoxy fibre de verre	0,86 @ 300 K
Acier inoxydable 304L	15,3 @ 300 K
Aluminium 6060	209 entre 273 K @ 373 °C (NF EN 573)
Cuivre Cu-b1	328 @ 293 K

Tableau 13 : Conductivités thermiques des matériaux constituant les supports d'accrochage de la cellule de mesure au réservoir d'azote liquide

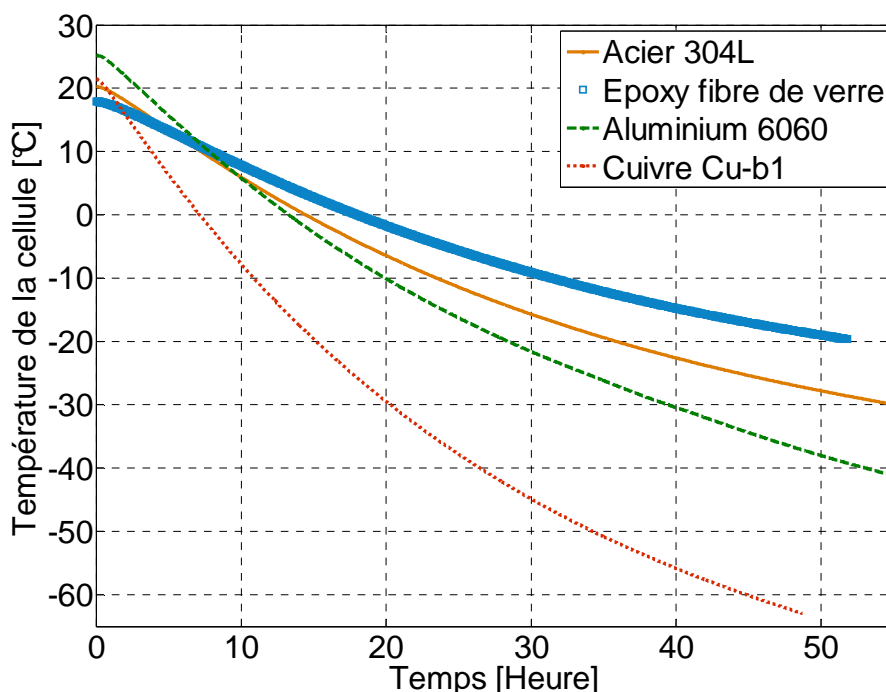


Figure 63 : Evolutions de la température de cellule, à la suite du remplissage du réservoir d'azote. La régulation est inactive et le composant est absent de la cellule. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. La cellule est placée sous un vide secondaire. Les différents supports d'accrochage de la cellule ont été testés

On observe que la variation de température est naturellement plus importante avec tous les autres matériaux constituant le support d'accrochage de la cellule par rapport au matériau composite (époxy fibre de verre). Ainsi, le cuivre Cu-b1 présente une réponse thermique plus rapide, suivie de l'aluminium 6060 et enfin de l'acier inoxydable 304 L.

Afin d'avoir une idée de l'impact du support d'accrochage sur l'étendue de mesure du calorimètre, nous avons reporté dans le Tableau 14 les variations de la température de la cellule au bout de 24 heures de refroidissement et pour différents matériaux du support d'accrochage.

Matériaux	Cuivre Cu-b1	Aluminium 6060	Acier inox 304L	Epoxy fibre de verre
ΔT [°C]	57,69	40,28	30,72	22,79

Tableau 14 : Ecarts de température $\Delta T = T_{0h} - T_{24h}$ obtenus au bout de 24 heures de refroidissement pour différents matériaux constituant le support d'accrochage de la cellule de mesure au réservoir d'azote

Le Tableau 14 montre que la variation est logiquement plus importante pour le cuivre, l'aluminium puis l'acier inoxydable et enfin le matériau composite (époxy fibre de verre). La variation de température de la cellule augmente donc avec la conductivité thermique du matériau utilisé. Toutefois, la rapidité de la dynamique peut conduire à une présence d'inhomogénéités thermiques sur la cellule de mesure, compte tenu de l'augmentation du flux échangé. L'influence de la nature du matériau du support d'accrochage de la cellule sur les gradients thermiques de cette dernière seront illustrés au paragraphe 9.

8.2. Réponse thermique en présence de la régulation

Le régulateur de température décrit au Chapitre II est un élément central pour nos mesures. En effet, la précision et la rapidité de notre mesure calorimétrique dépend en grande partie de la qualité du système de régulation.

8.2.1. Etude de la réponse thermique sans composant actif

Dans cette première expérience nous avons cherché à enregistrer le comportement thermique de notre cellule de mesure, lorsque sa température est régulée par le régulateur PTC 10. Nous avons tout d'abord stabilisé la température autour d'une certaine valeur puis nous avons enregistré la réponse thermique de la cellule à un échelon de température de $\Delta T = 10$ °C environ (Figure 64a). Tout au long de cette expérience, le support d'accrochage de la cellule de mesure est en acier inoxydable 304L. Dans la Figure 64b nous avons reporté l'évolution de la puissance de régulation correspondante.

On observe que les réponses thermiques de la cellule tendent vers leurs consignes respectives sans dépassement et sans oscillations marqués. Les mesures ont montré que les fluctuations de température restent inférieures à $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ K ; nous développerons cet aspect au paragraphe 8.2.2. Enfin nous pouvons dès à présent noter que le temps de réponse pour un écart de 10 °C entre la température initiale et la température finale de la cellule est d'environ trois heures.

On remarque (Figure 64b) que les fluctuations de la puissance de régulation deviennent $< \pm 10$ mW au delà de trois heures de régulation. Ces fluctuations auront de sérieuses conséquences sur la précision de mesure du calorimètre (§ 8.2.2). Notons enfin l'ordre de grandeur des fuites thermiques, ces dernières valent 453 mW à -30 °C.

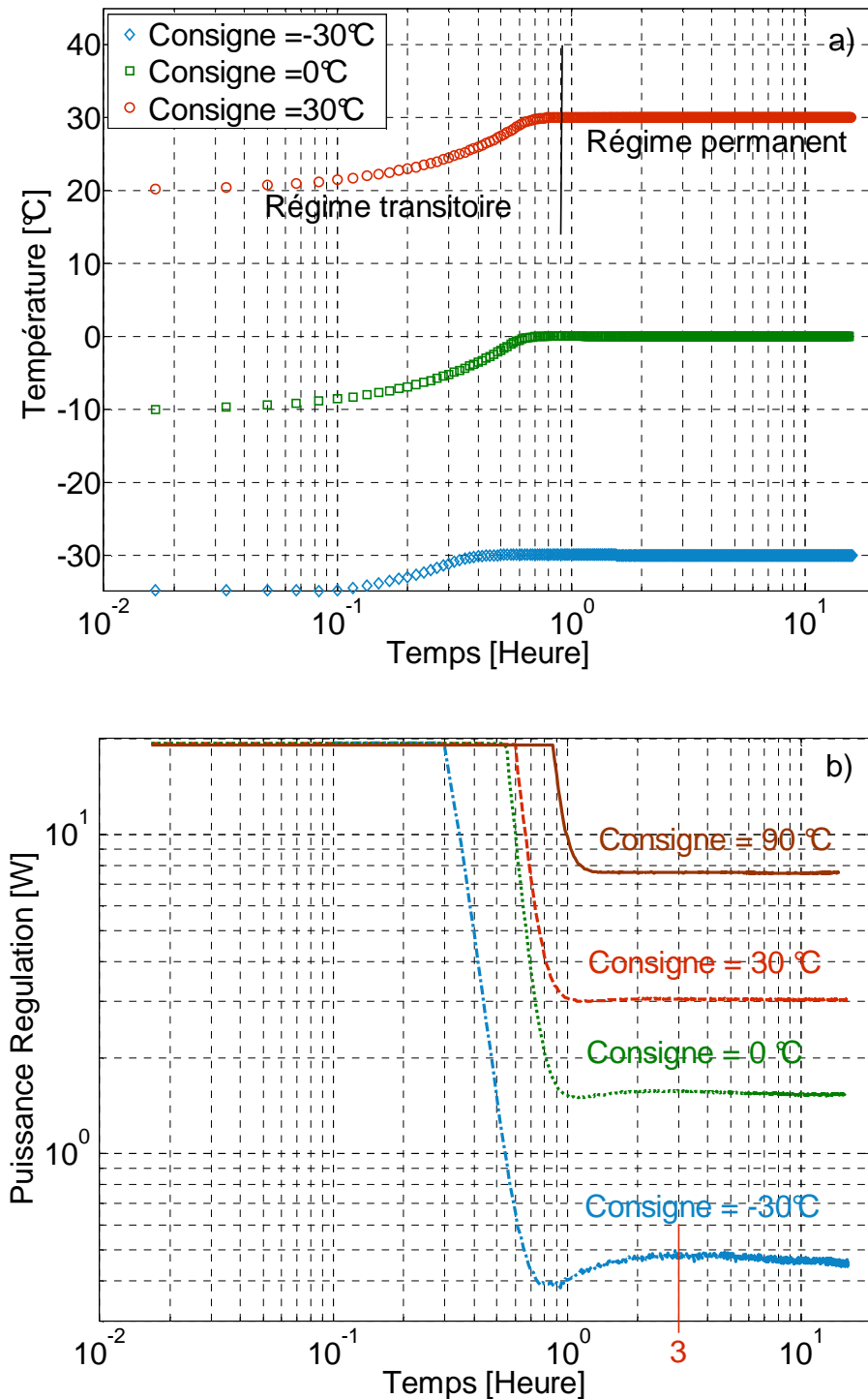


Figure 64 : Evolutions de la température (a) et de la puissance de régulation (b) de la cellule, en réponse à un échelon de température de 10 °C. La régulation est active mais le composant est absent de la cellule. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable

Dans cette deuxième expérience nous avons relevé le temps de réponse thermique de la cellule en fonction de la consigne de température qui lui est imposée (Figure 65). L'écart entre la température initiale et la température finale de régulation est à chaque fois égale à 10 °C. Les coefficients P, I et D du régulateur sont autodéterminés par ce dernier et ont pour valeurs respectives 17,73, 0,01 et 425,60. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite (époxy fibre de verre). Nous avons considéré le temps de réponse à 5 %, c'est-à-dire le temps que met la réponse pour que la valeur absolue de l'écart entre la valeur finale (consigne) et la valeur à l'instant donné reste inférieure à 5 % de la valeur finale.

Nous observons que le temps de réponse décroît légèrement avec l'augmentation de la température de consigne. Il est égale à 75 minutes lorsqu'on passe d'une température de -20 °C à une température de -10 °C puis, elle diminue avec l'augmentation de la consigne de température pour atteindre une valeur de 70 minutes lorsque l'on passe d'une température de 90 °C à une température de 100 °C. On peut donc estimer que le temps de réponse thermique de la cellule régulée en température ne dépasse pas les 75 minutes dans toute la gamme de température de mesure du calorimètre. La température de la cellule de mesure met donc un temps relativement long à se stabiliser, ce qui augmente par conséquent la durée de mesure.

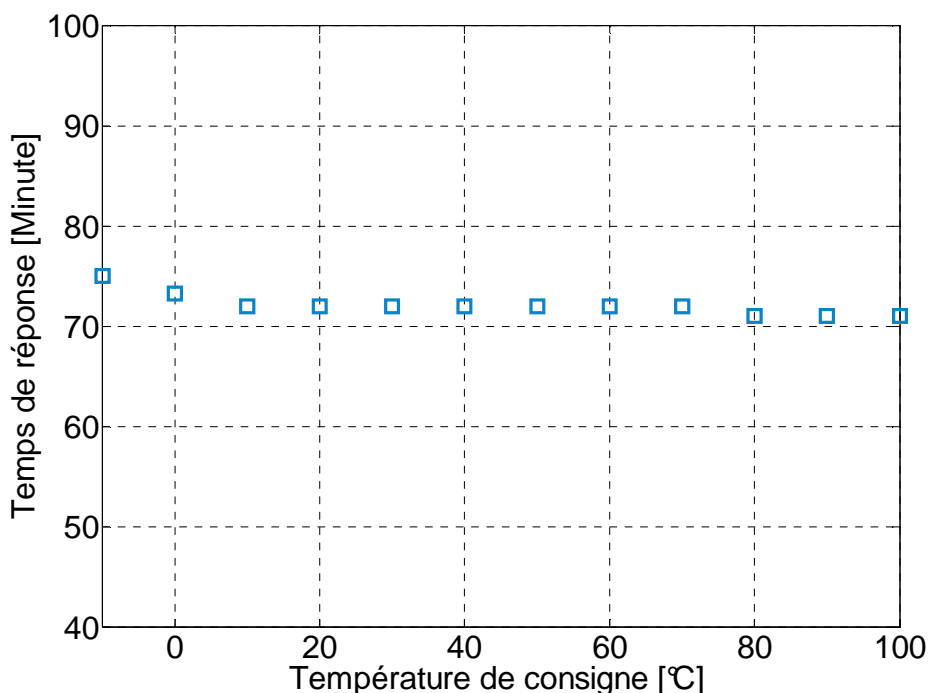


Figure 65 : Temps de réponse thermique de la cellule (à 5% de la valeur finale) en fonction des différentes températures de consignes. La température de la cellule a été enregistrée en réponse à des échelons de température de consigne de 10 °C. La régulation est active mais le composant est absent de la cellule. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. Le support d'accrochage de la cellule est en époxy fibre de verre

8.2.2. Etude de la réponse thermique avec composant actif

Dans cette expérience, nous avons enregistré l'évolution de la puissance de régulation et de la température de la cellule suite à l'activation du composant électrique, la consigne de température étant fixée à -30 °C (Figure 66). Le composant est une résistance en constantan (cf. § 11.1). Les pertes de puissance générées par effet Joules dans le composant sont établies à $103,3\text{ mW}$. Le support de la cellule de mesure est en acier inoxydable 304 L.

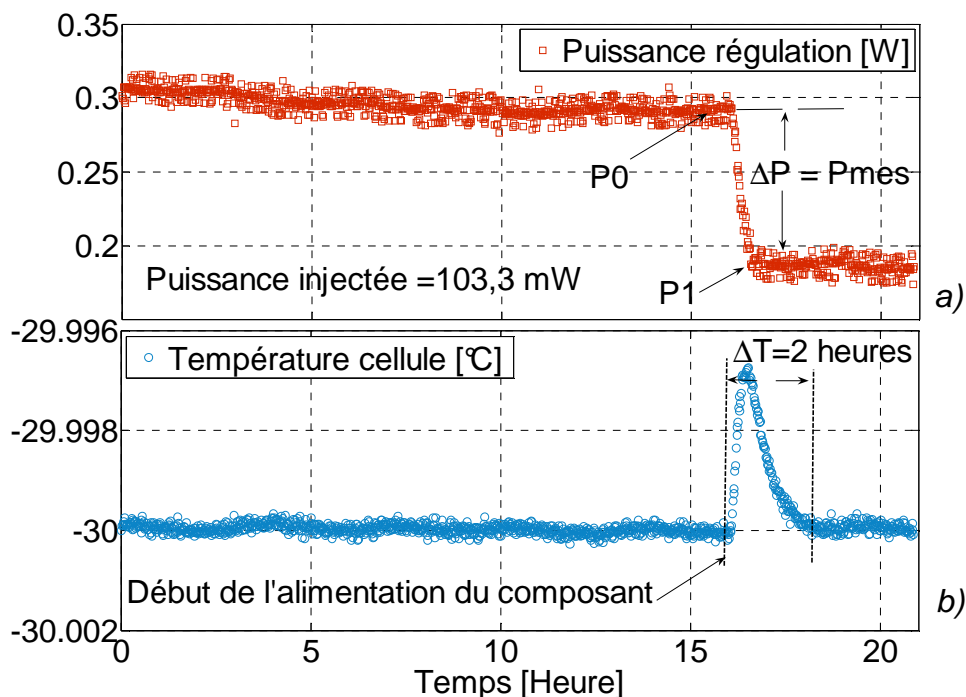


Figure 66 : a) Evolution de la puissance fournie par le régulateur pour maintenir la cellule à -30 °C lorsque l'on alimente un composant ; b) Evolution de la température de la cellule. Dans ces deux enregistrements un composant se met à dissiper une puissance de $103,3\text{ mW}$ à partir de la 16^{ème} heure de régulation

On peut observer que la puissance de régulation est stabilisée au bout d'une heure environ après le début de l'alimentation du composant (Figure 66). La perturbation thermique déclenchée sur la température de la cellule au point de régulation par la dissipation thermique du composant est, quant à elle, estompée deux heures après la mise sous tension de ce dernier. On remarquera que la résolution de mesure du conditionneur est excellente eu égard à la valeur de cette perturbation $\Delta T = \pm 2 \cdot 10^{-4}\text{ °C}$. Enfin, la puissance de régulation de la cellule observée, fluctue dans une fourchette de $\pm 10\text{ mW}$ similaire à ce que nous avons vu en absence de composant actif (cf. § 8.2.1 précédent).

Cette fluctuation est probablement caractéristique du système de régulation. Or, une trop grande fluctuation de la puissance de régulation, peut avoir pour conséquence de dégrader la précision du dispositif calorimétrique car la puissance dissipée est déduite de la puissance délivrée par le régulateur. Afin de limiter l'influence néfaste de cette fluctuation de puissance sur la précision de nos mesures, nous avons envisagé de moyenner cette puissance sur une durée de cinq minutes pour une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz. En effet, au bout de cinq minutes, la valeur moyenne obtenue semble stabilisée quelle que soit la température d'essai. Un

traitement du signal rudimentaire permet en définitive d'améliorer d'un ordre de grandeur la précision de mesure. En effet, nous passons ainsi d'une précision de ± 10 mW à ± 1 mW, quelle que soit la température d'essai.

9. Etude des gradients thermiques

Lors de la conception, de gros efforts ont été faits pour limiter au maximum les gradients thermiques sur divers éléments du dispositif. Nous allons observer dans ce paragraphe ce qu'il en est réellement sur la cellule de mesure, l'écran vertical E et l'enceinte à vide.

9.1. Etude des gradients thermiques dans l'épaisseur de la cellule

Les inhomogénéités thermiques dans l'épaisseur de la cellule de mesure sont essentiellement provoquées par les fils chauffants et par le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote.

9.1.1. Influence des fils chauffants

Nous avons étudié par simulation puis par imagerie thermique, les écarts de température dans la cellule de mesure en présence d'une génération de puissance dans les fils chauffants.

i. Simulation par éléments finis

Des simulations avec le logiciel Flux2D® ont été réalisées sur une pièce en cuivre assimilable à la cellule de mesure. Elle se présente sous la forme d'un demi-cylindre creux d'épaisseur 10 mm, de rayon extérieur égal à 100 mm et de profondeur égale à 100 mm. Le schéma du modèle est présenté sur la Figure 67. La Figure 68 montre la répartition des températures dans le domaine d'étude définie par la Figure 67 et pour une température ambiante fixée à 25 °C.

La distribution des températures dans le domaine semble globalement cohérente (Figure 68) puisque les températures sont plus élevées sur la cellule et diminuent progressivement lorsqu'on tend vers la frontière du milieu ambiant. Mais nous allons analyser ce résultat de plus près en nous intéressant maintenant à l'homogénéisation thermique de la cellule de mesure au voisinage d'un fil chauffant. Ainsi, l'évolution de la température sur le chemin AC (Figure 67), est présentée sur la Figure 69. Nous observons alors que la température entre les points A et B est pratiquement constante : elle prend des valeurs comprises entre $T_A = 47,838^\circ\text{C}$ au point A et $T_B = 47,84^\circ\text{C}$ au point B. Cependant, un pic de température apparaît entre le point B et le point C ($47,88^\circ\text{C}$), correspondant à la position du fil chauffant. Au-delà du pic, la température décroît jusqu'à une valeur de $47,853^\circ\text{C}$ au point C, elle reste notamment supérieure à la température au point A. Par conséquent, l'écart de température entre la surface interne à T_C (T_C : température au point C) et la surface externe à T_A est évaluée à $T_C - T_A = 0,015^\circ\text{C}$.

La Figure 70 présente l'évolution de l'écart de température $\Delta T = T(r) - T_A$, pour différentes températures T_A . On observe que l'écart ΔT reste quasiment nul jusqu'à $r = 6$ mm ; au-delà de cette position, il augmente avec la température T_A . Aussi, l'écart de température $T_C - T_A$ entre la surface interne et la surface externe augmente avec la température T_A , c'est-à-dire avec la puissance générée dans le fil chauffant. Or, nos capteurs de température ont une longueur de 6 mm et sont introduits dans l'épaisseur de la cellule sur une profondeur de 5 mm en partant de la surface externe

de la cellule, par conséquent, le gradient thermique radial créé par le fil chauffant au sein de la cellule aura une influence négligeable sur nos mesures.

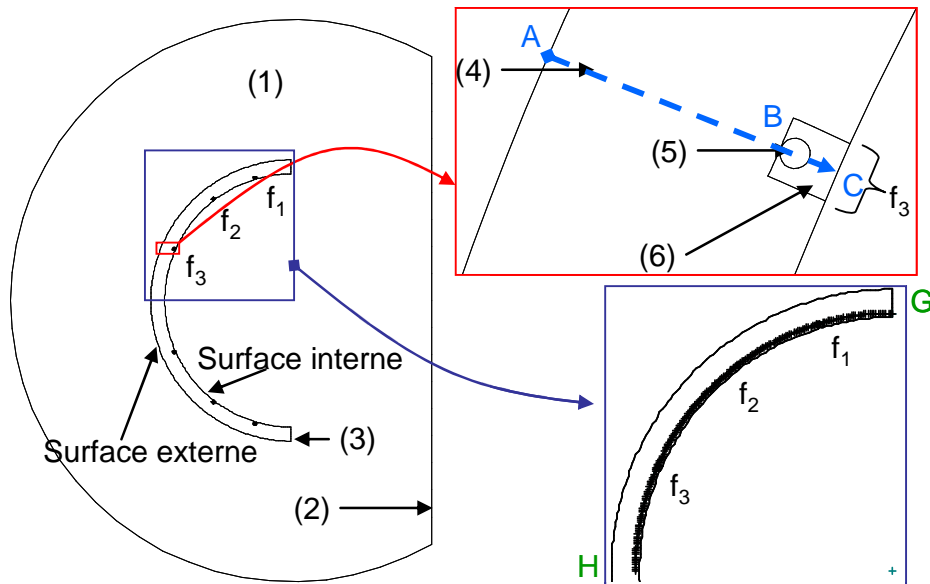


Figure 67 : Géométrie du domaine modélisé par éléments finis représentant la cellule de mesure : (1) vide (conductivité thermique équivalente $k_1=4\epsilon\sigma hT^3$, avec $h = 0,1$ m est la profondeur du cylindre, $T = 450$ K, $\epsilon = 0,03$ émissivité de l'or poli et $\sigma=5,67.10^{-8}$ est la constante de Stefan-Boltzmann) ; (2) frontière du milieu ambiant avec condition aux limites de température imposée ; (3) faces avec condition au limites de flux nul (adiabatique) ; (4) cellule de conductivité thermique $k_4=392$ W m⁻¹K⁻¹ ; (5) fil chauffant de 1 mm de diamètre (conductivité thermique $k_5 = 15$ W m⁻¹K⁻¹) ; (6) laque conductrice à l'argent (conductivité thermique $k_6=4$ W m⁻¹K⁻¹)

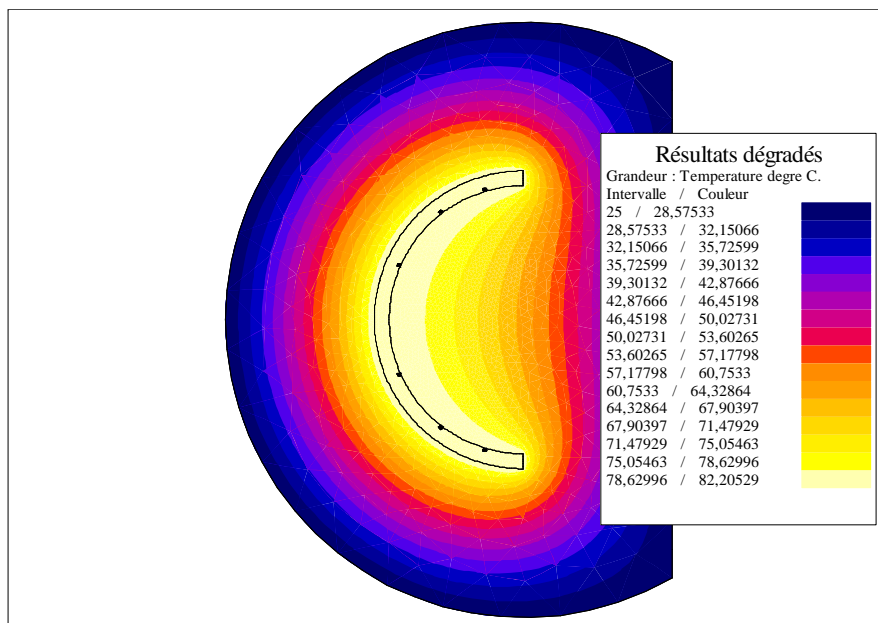


Figure 68 : Cartographie théorique des températures déduites du modèle par éléments finis réalisé sur Flux2D® en présence d'une génération de puissance dans les fils chauffants de la cellule de mesure

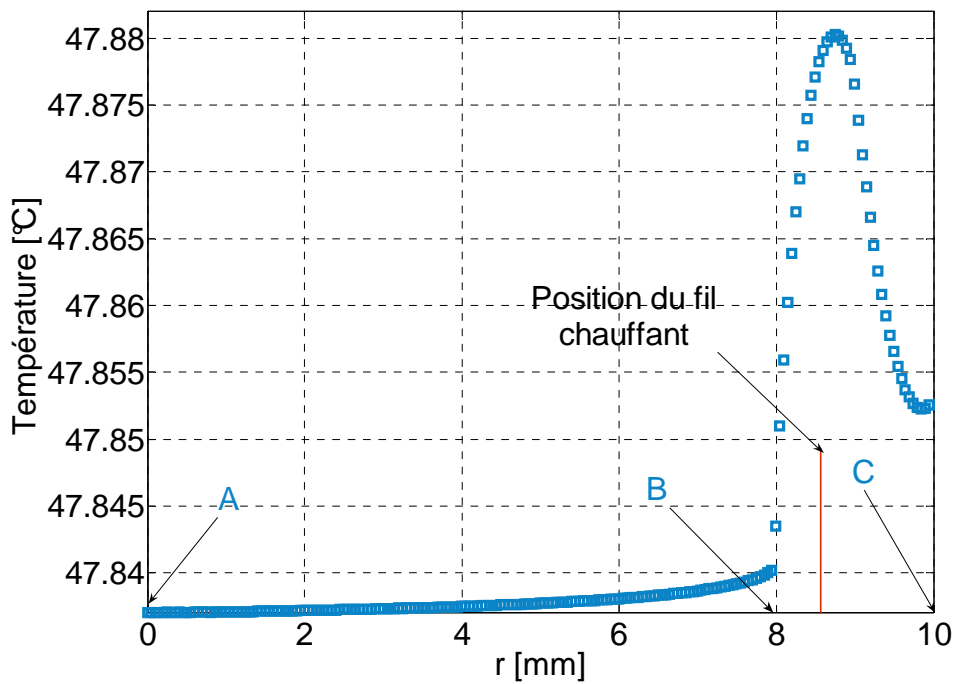


Figure 69 : Profil théorique de température obtenu le long du chemin AC ; l'abscisse r parcourt le segment [AC] de la surface externe S_3 (point A) vers la surface interne S_2 (point C) de la cellule de mesure

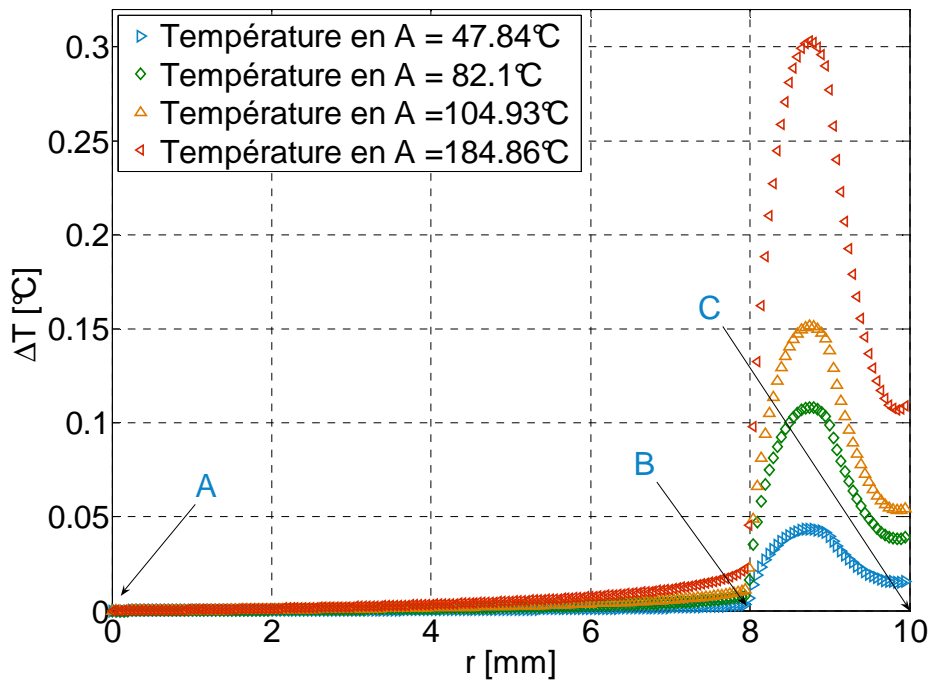


Figure 70 : Profils théoriques des écarts de température $\Delta T = T(r) - T_A$ obtenus le long du chemin AC pour différentes températures au point A

La Figure 71 présente l'évolution de la différence de température $T_C - T_A$ en fonction de la température T_A au point A. L'écart $T_C - T_A$ évolue linéairement avec la

température T_A , elle atteint une valeur de $0,12^\circ\text{C}$ à $T_A = 200^\circ\text{C}$. Cette dernière valeur correspond à la température maximale que peut atteindre notre calorimètre. Ainsi, on peut considérer en théorie que la variation radiale de température $T_C - T_A$ dans le pire des cas, c'est-à-dire au voisinage d'un fil chauffant, reste faible dans toute la gamme de température de fonctionnement du calorimètre.

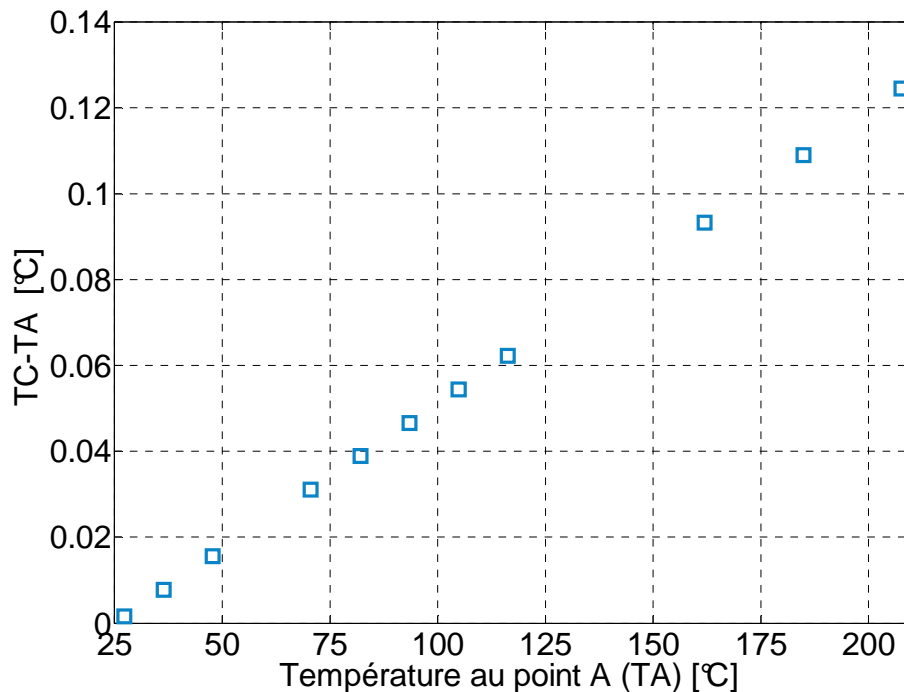


Figure 71 : Evolution théorique de l'écart de température $T_C - T_A$ en fonction de la température au point A (T_A) correspondant à différentes puissances générées dans le fil chauffant

Nous nous sommes également intéressés à l'influence de la température ambiante sur l'écart $\Delta T = T(r) - T_A$. La Figure 72 présente l'évolution de cet écart de température sur le chemin AC pour différentes valeurs de la température ambiante.

Les courbes correspondant aux différentes variations radiales de température $\Delta T = T(r) - T_A$ restent identiques avec l'évolution de la température ambiante, cette dernière n'a donc aucune d'influence sur ΔT et donc sur la variation radiale de la température de la cellule.

La répartition de la température sur les surfaces, interne (température au point C) et externe (température au point A) dans le sens de l'arc orienté **GH** est observée sur la Figure 73. Le paramètre s représente l'abscisse curviligne parcourant l'arc **GH** (de G vers H).

Les températures sur la surface interne et sur la surface externe (Figure 67), sont différentes mais très voisines. Les graphes correspondants à ces températures présentent des pics légèrement décalés qui indiquent les positions des fils chauffants. Ces pics sont plus importants sur la surface interne car le fil chauffant dans ce cas est situé à 1 mm de cette surface, contrairement à la surface externe, où le fil chauffant est situé à 8 mm de cette dernière.

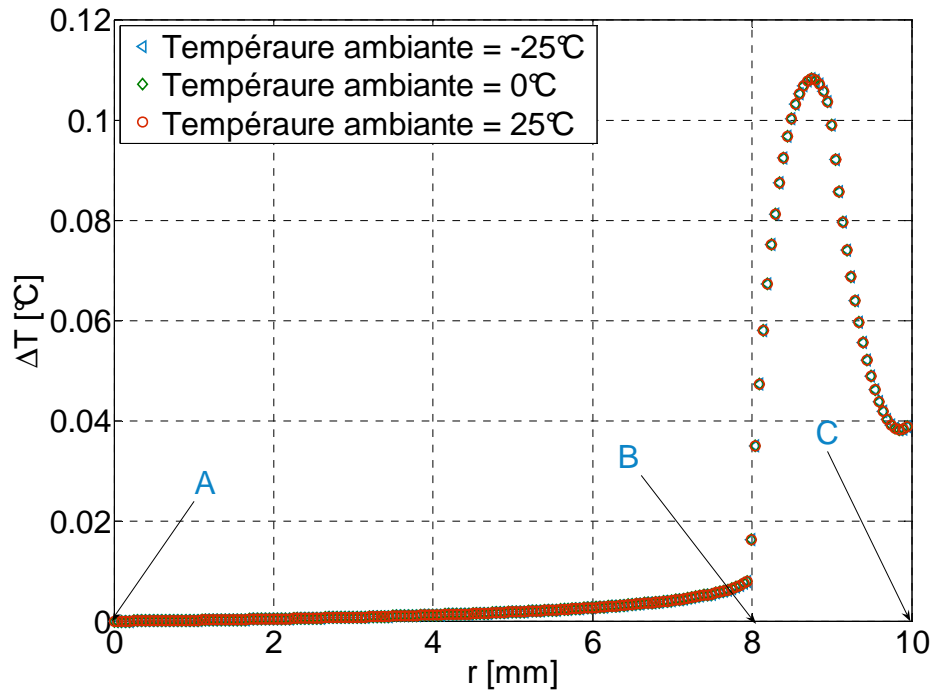


Figure 72 : Profils théoriques des écarts de température $\Delta T = T(r) - T_A$ obtenus le long du chemin AC lorsqu'on fait varier la température ambiante pour une même puissance générée dans les fils chauffants

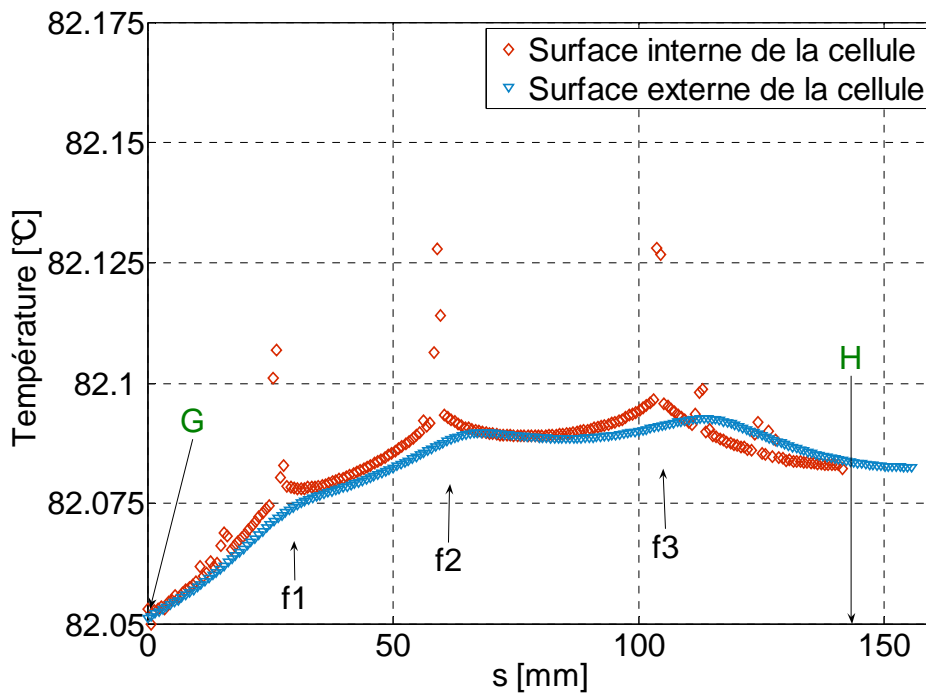


Figure 73 : Profils théoriques de température obtenus en parcourant des arcs de cercle pris respectivement sur la surface externe S_3 et interne S_2 de la cellule de mesure

Le décalage des pics observés entre les deux courbes vient du fait de la différence des rayons de courbure des surfaces considérées (Figure 67). Les variations de température présentes sur la surface externe ne dépassent pas $0,05^\circ\text{C}$

(Figure 73). Sur la surface interne, les pics de température correspondant aux points f1, f2 et f3 conduisent à des variations de température inférieures à 0,08°C sur cette surface. Ces écarts de température sont donc faibles. Cependant ils restent indécélables avec notre matériel de mesure (Pt100) puisque nous ne connaissons pas les erreurs systématique et aléatoire de nos capteurs Pt100.

ii. Imagerie thermique

Le champ de température sur la surface interne et sur la surface externe de la cellule de mesure est observé à l'aide d'une caméra infrarouge de type FLIR ThermaCAM T360 (Figure 74). Elle a une résolution de 76800 pixels avec une sensibilité thermique inférieure à 0,05 K.



Figure 74 : Caméra infrarouge FLIR ThermaCAM 360T

Le champ de température de la surface interne de la demi-sphère fixe (cellule de mesure) prise à l'air ambiant (température ambiante égale à 18,3 °C) est présenté sur la Figure 75. La demi-sphère est placée sur son système d'ouverture (Chapitre II paragraphe 4.4). Elle est maintenue à une température de 63 °C (température mesurée par une sonde Pt100) par chauffage électrique à travers le fil chauffant. La surface interne de la cellule de mesure est revêtue de la peinture noire de type Nextel Velvet Coating 811-21®.

Le champ de température (Figure 75) à l'intérieur de la cellule révèle que la température est plus élevée au niveau de la rainure contenant le fil chauffant. D'autres gradients thermiques plus faibles apparaissent sur la surface interne de la cellule, ces derniers ne sont pas intrinsèques à la cellule. Mais, leur présence est due d'une part à la convection thermique avec l'air ambiant et d'autre part, ils pourraient également s'expliquer par la variation de l'émissivité directionnelle de la surface interne de la cellule, cette dernière étant concave.

Pour la demi-sphère fixe, l'écart de température entre la rainure contenant le fil chauffant et la cellule proprement dite est de 2,3 °C. Cet écart est de 2,4 °C pour la demi-sphère mobile. Les variations de températures observées sont différentes de celles indiquées par la modélisation. La possible présence de cavités gazeuses lors du remplissage des rainures avec la laque d'argent et le mauvais contact thermique entre les fils chauffants et la paroi de la cellule de mesure pourraient expliquer cette différence avec la simulation.

Il faut noter que la présence des gradients thermiques observés sur la cellule de mesure n'a aucune influence sur le principe de mesure du calorimètre tant que ces derniers restent localiser dans une zone éloignée des capteurs de température qui sont collés dans des trous pratiqués sur la face externe de la cellule.

Enfin , la photo thermique prise sur la surface externe de la cellule ne nous a pas permis de visualiser les gradients de température sur cette surface compte tenu de sa géométrie et de la faible valeur de son émissivité (surface polie dorée). Les images thermiques que nous avons obtenues prennent en compte les rayonnements thermiques incidents provenant des sources environnantes rendant donc les images inexploitable.

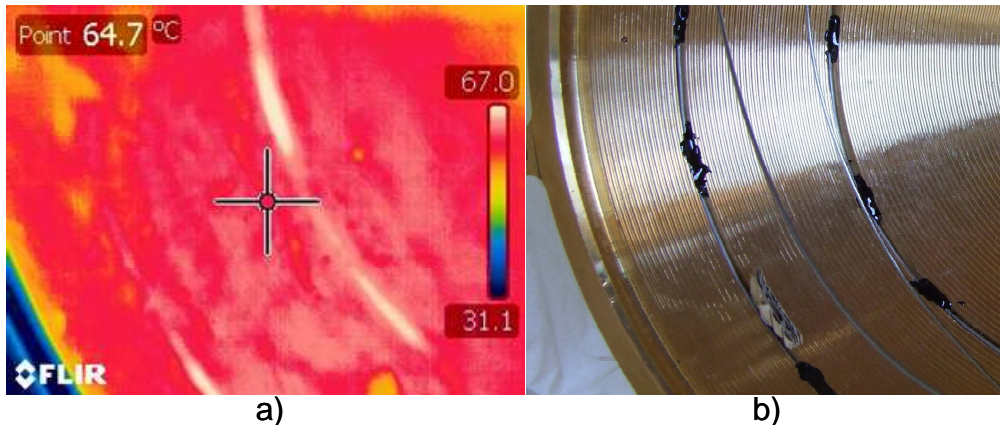


Figure 75 : a) Champs de température de la surface interne de la cellule obtenu par la caméra IR ThermaCAM T360 (La température mesurée par une sonde Pt100 est de 63°C) ; b) Photographie de la cellule de mesure avant revêtement de la peinture noire

9.1.2. Influence de la nature du support d'accrochage de la cellule

Rappelons que la cellule de mesure doit rester le plus homogène possible en température pour limiter l'influence des éventuels gradients thermiques sur les capteurs de température.

Par ailleurs, nous avons vu au paragraphe 8.1 que la dynamique thermique de la cellule de mesure pouvait être améliorée en utilisant des supports ayant une meilleure conductivité thermique que le matériau composite fait d'époxy et de fibres de verre. Or, on peut s'attendre à ce que ces barreaux ayant une meilleure conductivité thermique engendrent des gradients thermiques sur la cellule de mesure.

Afin de mettre en évidence les gradients de température sur la cellule de mesure, nous avons observé le comportement des écarts de température entre les sondes F1 et F3 d'une part et entre M1 et M3 d'autre part (Figure 77 et Figure 78). Ces écarts ΔT sont observés par rapport à la température mesurée par la sonde F1, lors du refroidissement de la cellule. Nous rappelons Figure 76 la disposition des sondes Pt100 sur la cellule de mesure. Les couples de sondes F1-F3 et M1-M3 ont été choisis de façon à renforcer la détection d'éventuels gradients de température le long du méridien sur lequel ces couples de sonde sont placés.

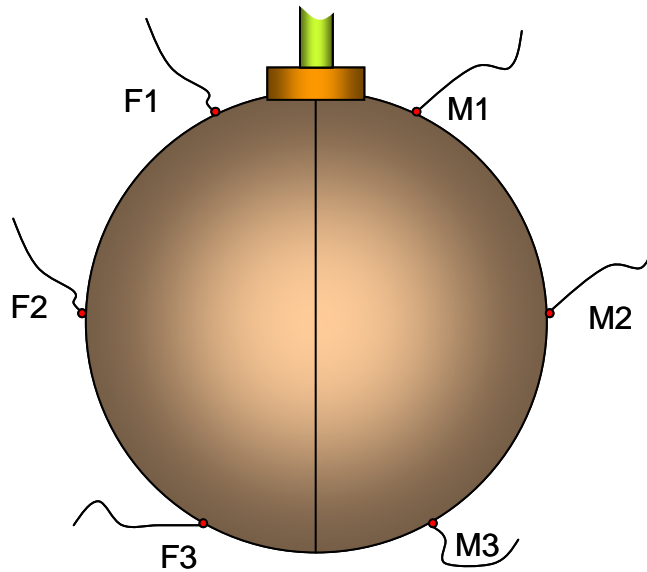


Figure 76 : Disposition des sondes Pt100 (F1, F2, F3, M1, M2 et M3) sur la cellule de mesure

La Figure 77 et la Figure 78 présentent les résultats obtenus respectivement sur la demi-sphère fixe et la demi-sphère mobile pour différents matériaux constituant le support d'accrochage de la cellule de mesure au réservoir d'azote liquide. Pour tous les matériaux, on observe que le ΔT est initialement important. En effet à l'instant initial de l'expérience, la température de la sphère est proche de la température du milieu extérieur au calorimètre (au voisinage de 22 °C) et le réservoir d'azote liquide vient à peine d'être rempli (-196 °C). Il est donc naturel de retrouver un fort gradient de température le temps que le flux de chaleur s'homogénéise dans la sphère. Notons que ce gradient est quasiment identique pour tous les matériaux lorsque la cellule est à la température ambiante ($\Delta T = 0,15$ °C). On remarque également que les écarts de température sur chaque demi-sphère finissent par atteindre des valeurs de l'ordre du dixième de degrés Celsius.

De manière inattendue, on remarque que le ΔT de la demi-sphère mobile est plus important que celui de la demi-sphère fixe. Nous soupçonnons pour cela l'effet de la sonde M1 qui semblerait répondre plus rapidement que les autres sondes (Figure 79).

Un autre résultat inattendu est que le ΔT de la demi-sphère fixe décroît alors même que le ΔT de la demi-sphère mobile croît lorsque la température de la cellule est inférieure à 15°C environ.

En revanche, le résultat obtenu sur la Figure 80 semble montrer que chaque demi-sphère affiche une bonne homogénéité en température.

L'écart de température ΔT sur la demi-sphère fixe et sur la demi-sphère mobile, reste difficile à quantifier car nous ne connaissons pas suffisamment bien la part aléatoire et la part systématique de l'erreur de mesure des sondes associées au conditionneur.

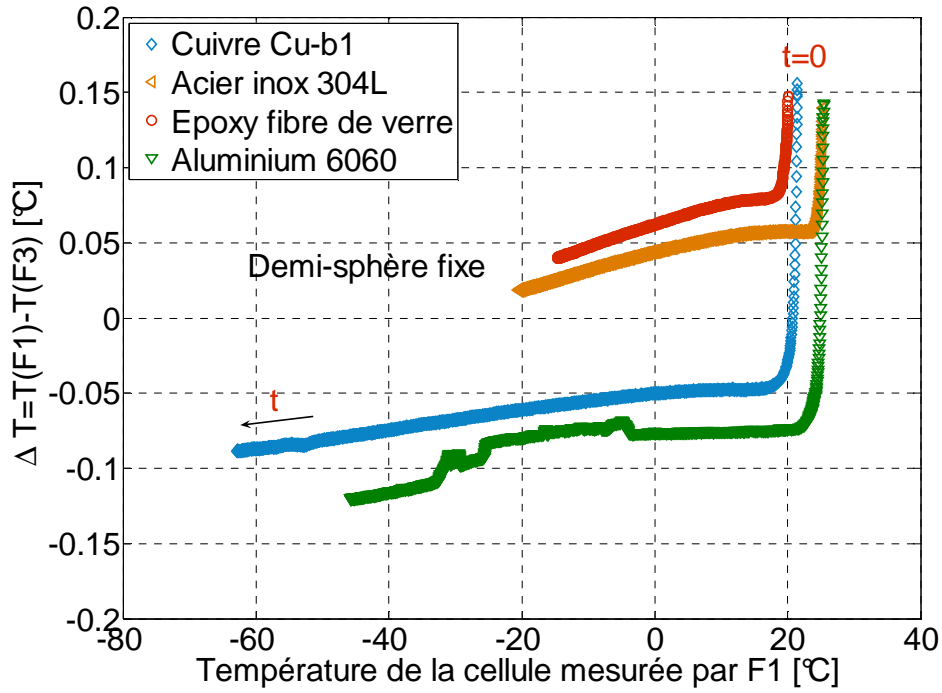


Figure 77 : Ecarts de température entre les sondes F1 et F3 (demi-sphère fixe) en fonction de la température de la cellule mesurée par la sonde F1 pour différents matériaux constituant son support d'accrochage au réservoir d'azote

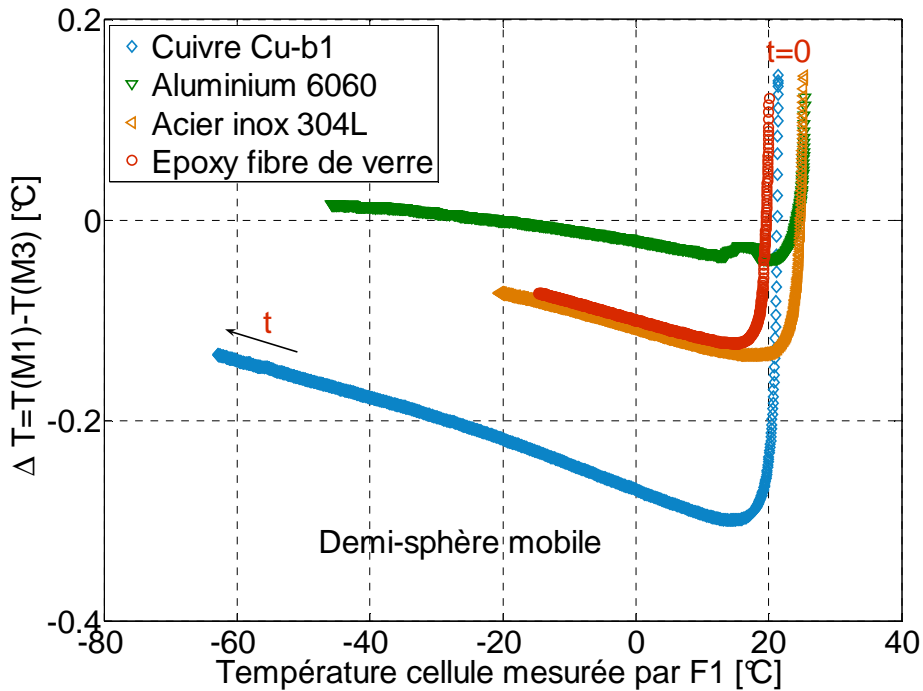


Figure 78 : Ecarts de température entre les sondes M1 et M3 (demi-sphère mobile) en fonction de la température de la cellule mesurée par la sonde F1 pour différents matériaux constituant son support d'accrochage au réservoir d'azote

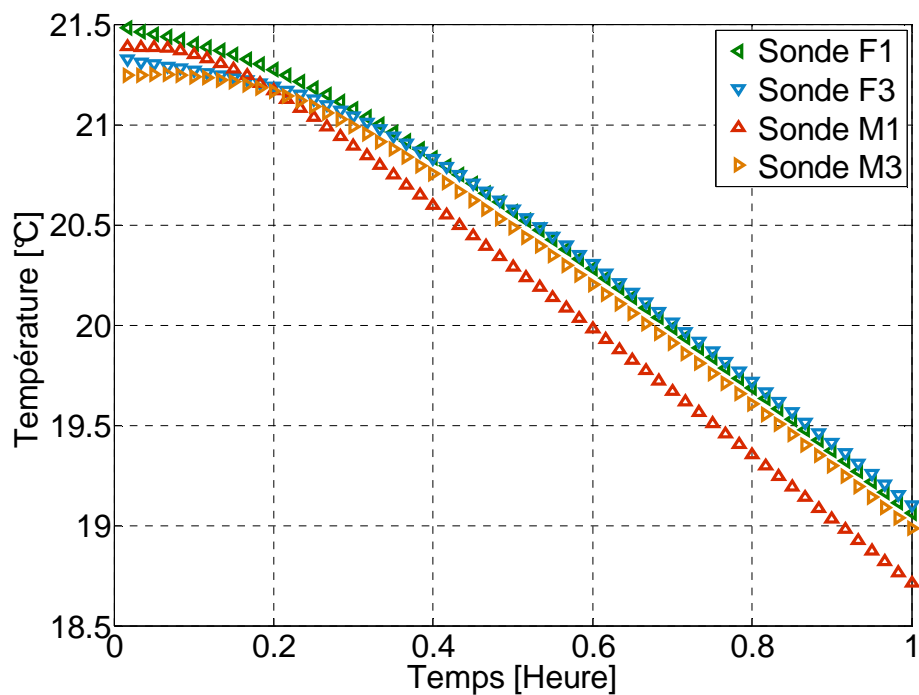


Figure 79 : Observation des températures mesurées à partir des sondes Pt100 immédiatement après le remplissage du réservoir d'azote. Le support d'accrochage de la cellule est ici en cuivre Cu-b1

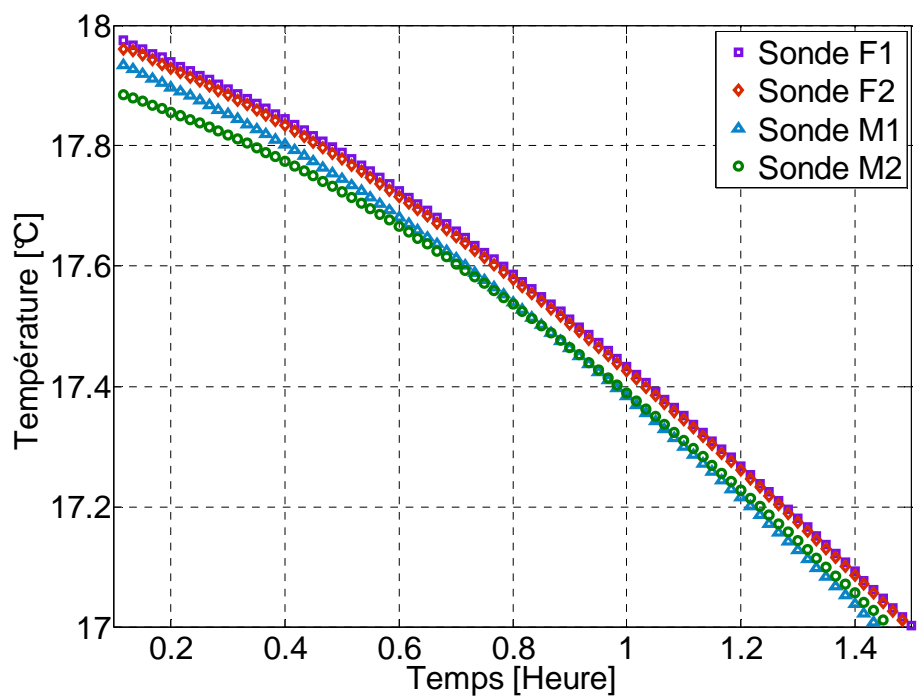


Figure 80 : Observation des températures mesurées à partir des sondes Pt100 immédiatement après le remplissage du réservoir d'azote. Le support d'accrochage de la cellule est ici en matériau composite (époxy fibre de verre)

En dépit du gradient de température introduit par le barreau de cuivre, cette solution présente l'avantage de favoriser la vitesse de descente en température de la cellule et permet ainsi d'étendre la gamme de température de mesure de notre dispositif comme nous le verrons au paragraphe 11.3.4.

9.2. Etude des gradients thermiques sur l'écran vertical et sur l'enceinte

Les capteurs de température collés sur l'écran vertical E montrent une différence de température égale 1 °C entre les deux thermocouples. Ces thermocouples étant de type K, la différence de température entre ces deux capteurs est de l'ordre de la précision de mesure de ces éléments. La mesure du gradient thermique est par conséquent limitée par la précision de mesure des thermocouples on peut néanmoins considérer la surface de l'écran E comme relativement isotherme conformément à notre modèle analytique.

Quant aux capteurs de température collés sur l'enceinte à vide, ils révèlent une différence de température de 2 °C entre les deux thermocouples de type K. On peut néanmoins considérer la surface de l'enceinte à vide comme relativement isotherme conformément à notre modèle analytique.

9.3. Synthèse des gradients thermiques

Nous avons observé les gradients de température sur la cellule de mesure, l'écran vertical E et l'enceinte à vide du calorimètre.

Sur la cellule de mesure, les gradients de température sont essentiellement causés par les fils chauffants et le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote liquide.

La simulation par éléments finis sur Flux2D® au voisinage d'un fil chauffant dans une pièce en cuivre assimilable à la cellule de mesure, a montré que l'écart radial de température entre la surface interne et la surface externe ne dépasse pas 0,015 °C lorsque la température de la cellule est de l'ordre de grandeur de 47,8 °C. Cet écart de température ne dépend pas de la température du milieu extérieur à la cellule. Aussi, quelle que soit la température de la cellule (i.e. la puissance générée dans le fil chauffant), le gradient thermique reste quasiment nul de la surface externe de la cellule jusqu'à une profondeur de 6 mm dans l'épaisseur de cette dernière. Ceci indique que nos capteurs de température (placés à 5 mm de profondeur dans l'épaisseur de la cellule) ne subissent aucune influence de la part du gradient radial de température créé par le fil chauffant.

Nous avons également montré que les variations de température présentes sur la cellule de mesure ne dépassaient pas 0,05 °C sur la surface externe et 0,08 °C sur la surface interne de cette dernière (Figure 73).

Le champ de température de la surface interne de la cellule observé avec la caméra infrarouge montre un écart de température conséquent entre la position du fil chauffant et la cellule proprement dite. Cet écart est de 2,3 °C sur la demi-sphère fixe et de 2,4 °C sur la demi-sphère mobile à une température fixée sur la cellule égale à 63 °C. L'importance de ces écarts est directement attribuée au mauvais contact thermique entre le fil chauffant et la paroi de la cellule, et à la présence de cavités gazeuses dans la rainure contenant le fil chauffant lors du remplissage de cette dernière avec de la laque d'argent. Ces gradients thermiques observés n'ont aucune influence sur le principe de mesure du calorimètre tant qu'ils restent localisés dans une zone éloignée des capteurs de température.

Afin de mettre en évidence les gradients de température sur la cellule de mesure créés par son support d'accrochage au réservoir d'azote, nous avons observé le comportement des écarts de température entre les sondes F1 et F3 d'une part et entre M1 et M3 d'autre part (Figure 77 et Figure 78). Les écarts ΔT sont observés par rapport à la température de la cellule mesurée par la sonde F1, lors du refroidissement de la cellule. Cette observation s'est faite pour différents matériaux du support d'accrochage de la cellule de mesure au réservoir d'azote (cuivre Cu-b1, Aluminium 6060, Acier inoxydable 304 L).

Ainsi, nous avons vu que ΔT augmente avec la température de la cellule mesurée par F1 pour tous les matériaux testés. Il est quasiment identique pour tous les matériaux lorsque la cellule est à la température ambiante ($\Delta T = 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$). On a également remarqué que les écarts de température sur la demi-sphère fixe et sur la demi-sphère mobile étaient de l'ordre du dixième de degrés Celsius.

La cellule de mesure peut donc être considérée comme quasiment homogène en température. Mais l'information ne pourrait être confirmée qu'en connaissant parfaitement les erreurs systématiques et aléatoires des mesures. Ceci valide donc partiellement l'hypothèse du modèle analytique des échanges de chaleur.

Aussi les capteurs de température collés sur l'écran verticale E et sur l'enceinte à vide montrent des écarts de température respectivement de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ et $2 \text{ }^\circ\text{C}$ sur ces deux constituants. Ainsi, l'hypothèse de surface isotherme prise dans le modèle pour ces deux éléments peut être considérée comme réalisée.

10. Etendue de mesure de la puissance dissipée par un composant

Pour être mesurée à une température d'essai donnée, la puissance thermique générée dans un composant à tester doit être inférieure à la puissance de régulation nécessaire pour maintenir la cellule de mesure à cette température.

La Figure 81 présente une comparaison entre les courbes théorique et expérimentale de la puissance de régulation en fonction de la température imposée sur la cellule. Cette puissance de régulation représente la puissance maximale mesurable que peut dissiper un composant à tester à la consigne de température correspondante. Le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote est ici en matériau composite (fait d'époxy et de fibres de verre), et la température extérieure au calorimètre égale à $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

On observe que la puissance de régulation augmente avec la température d'essai dans les deux cas (théorie et expérience). Cependant la courbe donnée par l'expérience reste au-dessus de celle donnée par la théorie et l'écart entre les deux courbes augmente avec la température de la cellule.

Ainsi, pour une température de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ imposée à la cellule, la puissance maximale mesurable est de 2 W en théorie et de 6 W en pratique. Pour une température de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, elle est de $2,5 \text{ W}$ en théorie et de 8 W en pratique.

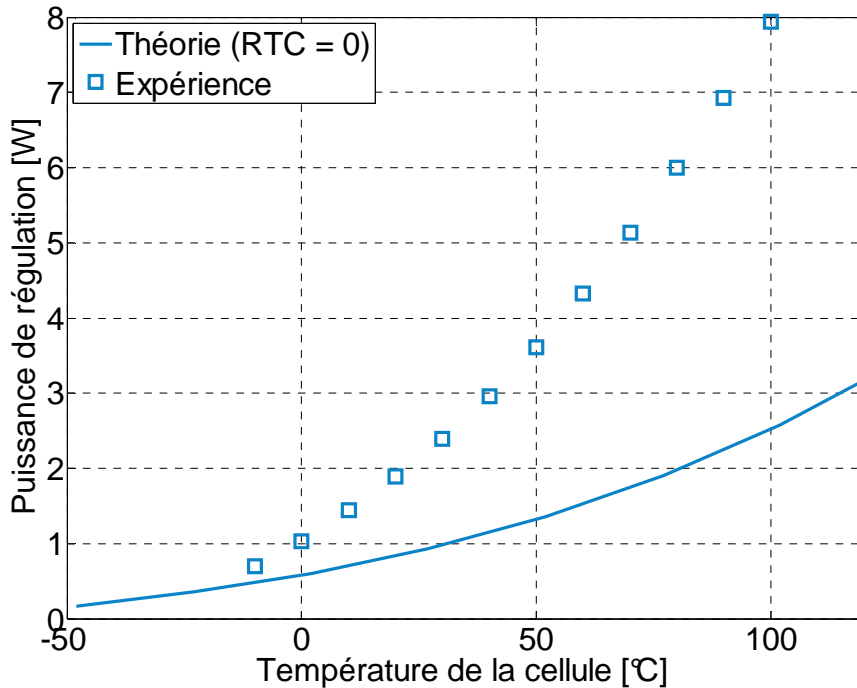


Figure 81 : Comparaison de la puissance fournie par la régulation pour maintenir la cellule à une température imposée entre la théorie et l'expérience. Le composant est inactif. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite (époxy fibre de verre)

La différence observée sur la puissance de régulation entre les courbes théorique et expérimentale pourrait s'expliquer tout d'abord par le fait que nous n'avons pas pris en compte le rayonnement thermique du support de la cellule au réservoir d'azote et ensuite par le fait que nous n'avons pas pris en compte les différentes résistances thermiques de conduction dues :

-à l'isolant des amenées de courant d'alimentation du composant dont les résistances sont données par R_{THsol1} et R_{THsol2} .

$$R_{THsol1} = \frac{L_{30}}{k_{Silicone} * A_{Silicone}} \quad (149)$$

$$R_{THsol2} = \frac{L_{30} - 2R_3}{k_{Silicone} * A_{Silicone}} \quad (150)$$

où $k_{Silicone}$ et $A_{Silicone}$ sont respectivement la conductivité thermique et la section de l'isolant des amenées de courant d'alimentation du composant ($k_{Silicone} = 1 \text{ W / (m K)}$ et $A_{Silicone} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$).

-aux amenées de courant des fils d'alimentation des sondes Pt100 notées R_{THPt1} (pour la résistance thermique équivalente due aux fils d'alimentation des sondes F1 et M1), R_{THPt2} (pour la résistance thermique équivalente due aux fils d'alimentation des sondes F2 et M2) et R_{THPt3} (pour la résistance thermique équivalente due aux fils d'alimentation des sondes F3 et M3) et dont les expressions sont données par :

$$R_{THPt1} = \frac{L_{30} - 2R_3}{8k_{Cu}(T_{3,0}) * A_{Pt}} \quad (151)$$

$$R_{THPt2} = \frac{L_{30} - R_3}{8k_{Cu}(T_{3,0}) * A_{Pt}} \quad (152)$$

$$R_{THPt3} = \frac{L_{30}}{8k_{Cu}(T_{3,0}) * A_{Pt}} \quad (153)$$

où A_{Pt} est la section des amenées de courant des sondes Pt100 ($A_{Pt}=0,05 \text{ mm}^2$) et L_{30} est la distance séparant les points de thermalisation de l'amenée de courant d'alimentation du composant à la cellule de mesure et au réservoir d'azote liquide ($L_{30} = 0,6 \text{ m}$).

-aux amenées de courant des fils chauffants considérées identiques et de résistance thermique équivalent notée $R_{THChauf}$.

$$R_{THChauf} = \frac{L_{30} - R_3}{4k_{Cu}(T_{3,0}) * A_C} \quad (154)$$

En prenant en compte le rayonnement émis par le support d'accrochage de la cellule (cependant l'échange par rayonnement entre le support et la cellule n'a pas été pris en compte ici) et toutes les résistances thermiques de conduction que nous venons d'énumérer, le bilan de puissance sur la cellule donné par l'équation (94) doit être maintenant remplacé par l'équation (155) :

$$\begin{aligned} & Q_1 + Q_3 + \frac{\sigma(T_{EI}^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,EI}} + \frac{\sigma(T_H^4 - T_3^4)}{\mathfrak{R}_{3,H}} + \\ & (T_0 - T_3) \times \left(\frac{1}{R_{TH31}} + \frac{1}{R_{TH31r}} + \frac{1}{R_{TH3Isol1}} + \frac{1}{R_{TH3Isol2}} + \frac{1}{R_{TH3S}} + \right. \\ & \left. \frac{1}{R_{THPt1}} + \frac{1}{R_{THPt2}} + \frac{1}{R_{THPt3}} + \frac{1}{R_{THChauf}} \right) \\ & + \sigma F_{SuppE} S_{Supp} \left(\left(\frac{T_H + T_3}{2} \right)^4 - T_{EI}^4 \right) + \sigma F_{SuppH} S_{Supp} \left(\left(\frac{T_H + T_3}{2} \right)^4 - T_H^4 \right) = 0 \end{aligned} \quad (155)$$

où la résistance thermique R_{TH3} de l'équation (94) est décomposée en résistance R_{TH31} et R_{TH31r} avec :

$$R_{TH31} = \frac{L_{30}}{k_{Cu}(T_{3,0}) * A_C} \quad (156)$$

$$R_{TH31r} = \frac{L_{30} - 2R_3}{k_{Cu}(T_{3,0}) * A_C} \quad (157)$$

F_{SuppE} et F_{SuppH} sont les facteurs de forme entre le support d'accrochage de la cellule et l'écran vertical E d'une part et l'écran horizontal H d'autre part. Ces facteurs de formes sont déterminés à partir des relations (158) et (159) [Sparrow1962].

$$F_{SuppH} = \frac{B}{8RH} + \frac{1}{2\pi} \left\{ \cos^{-1}\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{1}{2H} \left[\frac{(A+2)^2}{R^2} - 4 \right]^{1/2} \right. \\ \left. \times \cos^{-1}\left(\frac{AR}{B}\right) - \frac{A}{2RH} \sin^{-1} R \right\} \quad (158)$$

$$F_{SuppE} = 1 - F_{SuppH} \quad (159)$$

où $R = r_{Supp} / R_H$; $H = L_H / R_H$; $A = H^2 + R^2 - 1$; $B = H^2 - R^2 + 1$, avec r_{Supp} rayon du support de la cellule et L_H sa longueur ($r_{Supp} = 6.10^{-3}$ m ; $L_H = 0,14$ m).

A.N. : $F_{SuppH} = 0,186$ et $F_{SuppE} = 0,814$. S_{Supp} est la surface latérale du support d'accrochage de la cellule ($S_{Supp} = 3,4.10^{-3}$ m²).

La Figure 82 reproduit la Figure 81 en prenant en compte le graphe de la puissance de régulation lorsque l'on remplace l'équation (94) par l'équation (155) dans le modèle analytique des échanges de chaleurs du calorimètre.

On observe que la courbe théorique réalisée en prenant en compte l'équation (155) se rapproche considérablement de la courbe expérimentale mais il reste cependant une différence qui pourrait être en partie expliquée par le fait que la puissance de régulation diminue expérimentalement au cours du temps, comme on peut l'observer sur la Figure 83.

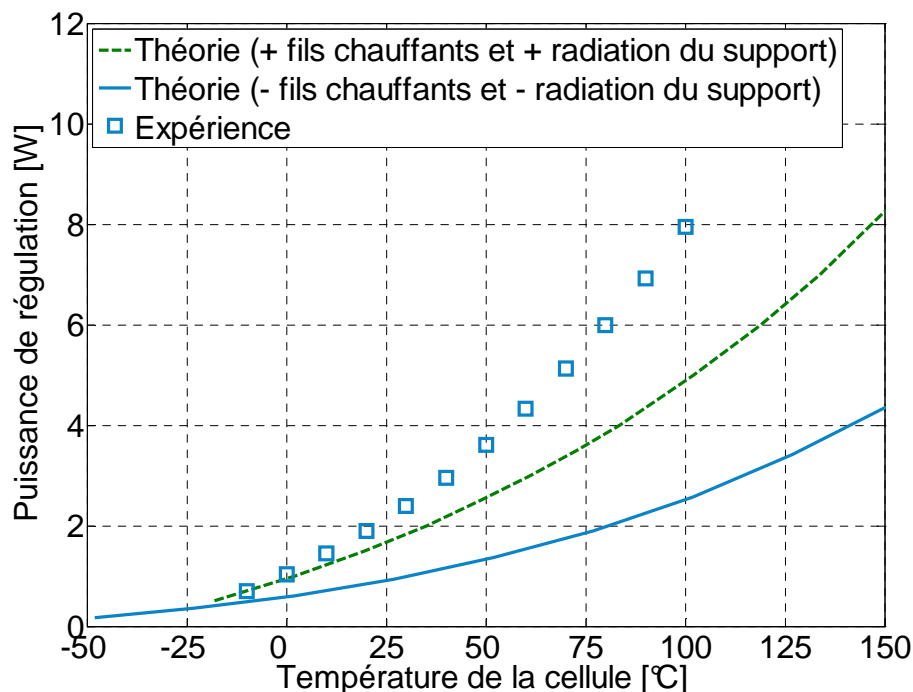


Figure 82 : Comparaison de la puissance fournie par la régulation pour maintenir la cellule à une température imposée entre la théorie et l'expérience. Le composant est inactif. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite (époxy fibre de verre) en prenant en compte l'équation (155)

En effet, la Figure 83 montre l'évolution de la puissance fournie par le régulateur au cours du temps pour une température de 0 °C imposée sur la cellule de mesure. Le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote est soit en cuivre (Figure 83a) soit en acier inoxydable (Figure 83b).

Les variations de la puissance fournie par le régulateur au bout de 8 heures de temps de régulation à 0 °C sont égales à 10 mW pour le cuivre et 5 mW pour l'acier inoxydable. Ceci montre que le régime permanent est difficile à atteindre et cette difficulté est plus grande avec un support d'accrochage moins bon conducteur thermique.

Ainsi, la mesure de la puissance de régulation n'est pas réellement effectuée dans les conditions de régime thermique stationnaire. On peut donc s'attendre à ce que la puissance fournie par le régulateur et mesurée expérimentalement soient plus faibles au temps très longs et se rapprochent ainsi de la théorie.

En conséquence, la mesure d'une puissance P_0 ou P_1 n'est valable que pour une durée de plusieurs heures. Attendre un temps très long (une dizaine d'heures) peut avoir pour conséquence de dégrader la mesure de la puissance fournie par le régulateur.

Aussi, la puissance fournie par le régulateur est très faible aux températures inférieures à -20 °C pour notre matériau composite. Ces dernières (températures inférieures à -20 °C) nécessitent des temps de refroidissement de la cellule très long. Par conséquent, les mesures aux basses températures (< -20 °C) sont limitées avec le support de la cellule constitué en matériau composite. Ce support ne permet donc pas de recouvrir la gamme de température envisagée (-50 °C à +150 °C).

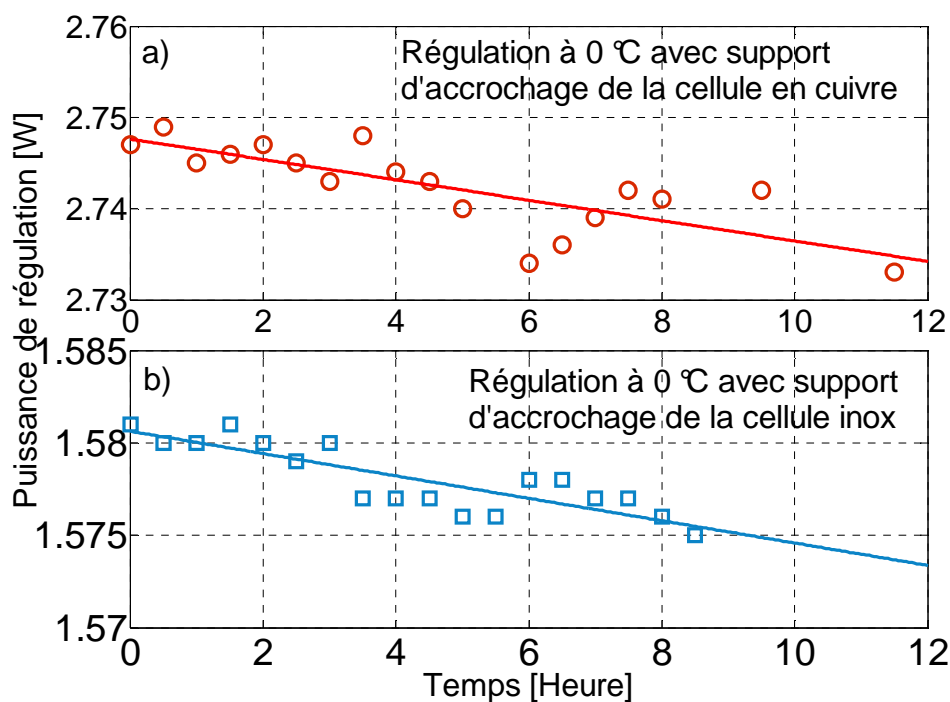


Figure 83 Variation de la puissance fournie par la régulation au cours du temps pour maintenir la température de la cellule à la consigne imposée de 0 °C. a), le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304L, b) ce support d'accrochage est en cuivre Cu-b1 b)

Afin d'élargir la gamme de température et de puissance mesurable du calorimètre, les mêmes mesures ont été réalisées avec différents matériaux constituant le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote. Les matériaux utilisés sont les mêmes qu'au paragraphe 8.1.

La Figure 84 présente l'évolution de la puissance fournie par le régulateur en fonction de la température imposée sur la cellule de mesure.

On observe dans tous les cas que les courbes de puissance fournie par le régulateur données par les différents matériaux augmentent en fonction de la température imposée sur la cellule. Aussi, pour une même température imposée à la cellule, la puissance fournie par le régulateur est plus importante avec le cuivre, qu'avec l'aluminium et l'acier inoxydable. Cette augmentation de puissance croît donc avec la conductivité thermique du matériau constituant le support d'accrochage.

En conséquence, on a une puissance fournie par la régulation de 861 mW à -60 °C avec le support d'accrochage en cuivre. Des puissances plus faibles que cette valeur peuvent encore être mesurées à -70 °C étendant ainsi la plage de température de mesure du dispositif.

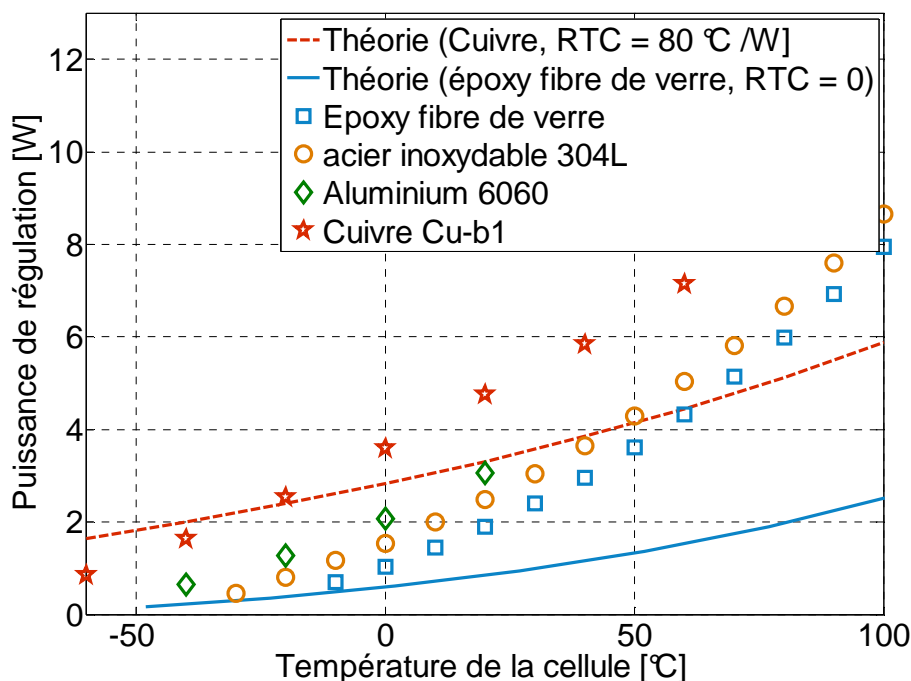


Figure 84 : Puissance fournie par la régulation pour maintenir la cellule à une température imposée pour différents matériaux constituant le support d'accrochage. Le composant est inactif. Les courbes continue et en pointillé représentent le modèle théorique respectivement pour un support d'accrochage en matériau composite et en cuivre

Les mesures à très basse température pourront donc être réalisées avec ce support, qui permet en même temps de gagner aussi bien en gamme de puissance mesurable à une température donnée qu'en gamme de température à imposer sur la cellule de mesure.

Cependant, nous verrons au paragraphe 11.3.4 que les supports d'accrochage « bon » conducteurs thermiques entraînent une détérioration de la précision de mesure du calorimètre. Cette détérioration est d'autant plus importante que la puissance mesurée est faible (≤ 100 mW).

Nous avons réalisé une estimation par régression polynômiale des valeurs de la puissance fournie par la régulation en fonction de la température imposée sur la

cellule afin de pouvoir prédéterminer cette puissance. Le matériau constituant le support d'accrochage de la cellule est ici en cuivre.

Ainsi, la puissance fournie par la régulation Q_3 à une température T_3 imposée sur la cellule de mesure peut être estimée à partir de la relation (160).

$$Q_3 = 1,2667 \cdot 10^{-8} T_3^4 - 2,186 \cdot 10^{-8} T_3^3 + 7,6943 \cdot 10^{-5} T_3^2 + 0,05307 T_3 + 3,5986 \quad (160)$$

où T_3 est exprimée en degrés Celsius et Q_3 en Watts, le coefficient de corrélation correspondant à l'équation (160) est égal à 0,9999.

Toutefois, la relation (160) peut évoluer en fonction de la température du milieu ambiant. Les points de mesure présentés sur la Figure 84 sont valables pour une température ambiante comprise entre 20 °C et 25 °C.

11. Validation du dispositif sur un composant purement résistif

La validation du calorimètre est effectuée à partir de la mesure de la puissance thermique dissipée par effet Joule dans un composant purement résistif (Figure 85).

11.1. Caractéristiques du composant de référence

Le composant est une résistance bobinée avec du fil de constantan de 0,1 mm de diamètre (Figure 85). Ce fil est bobiné sur un tube de cuivre de 30 mm de long, 20 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur. Le composant est ensuite peint en noir avec la peinture Nextel Velvet Coating 811-21® pour augmenter son émissivité.

Le fil de constantan et le tube de cuivre sont choisis respectivement pour limiter l'influence de la température sur la résistivité électrique du composant et pour limiter la capacité thermique de cette éprouvette.

La résistance électrique de notre composant est évaluée à 1047,2 Ω . Elle a été mesurée à l'aide d'un multimètre de type MANUDAX M-4650®.

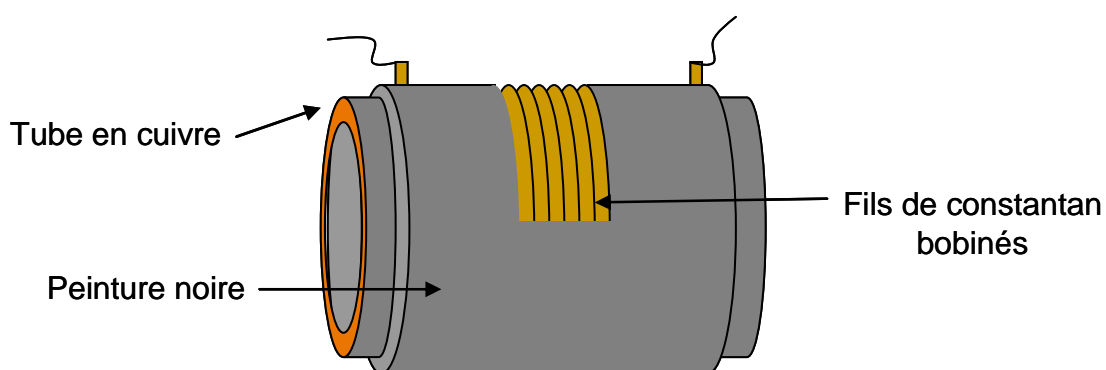


Figure 85 : Schéma du composant résistif. Il est constitué d'un tube en cuivre de diamètre 20 mm, de longueur 30 mm et d'épaisseur 1 mm, sur lequel est bobiné un fil de constantan. L'ensemble est ensuite recouvert de peinture noire. La résistance électrique totale du composant est de 1047,2 Ω

La Figure 86 présente le schéma de connexion des différents éléments de mesure du dispositif expérimental

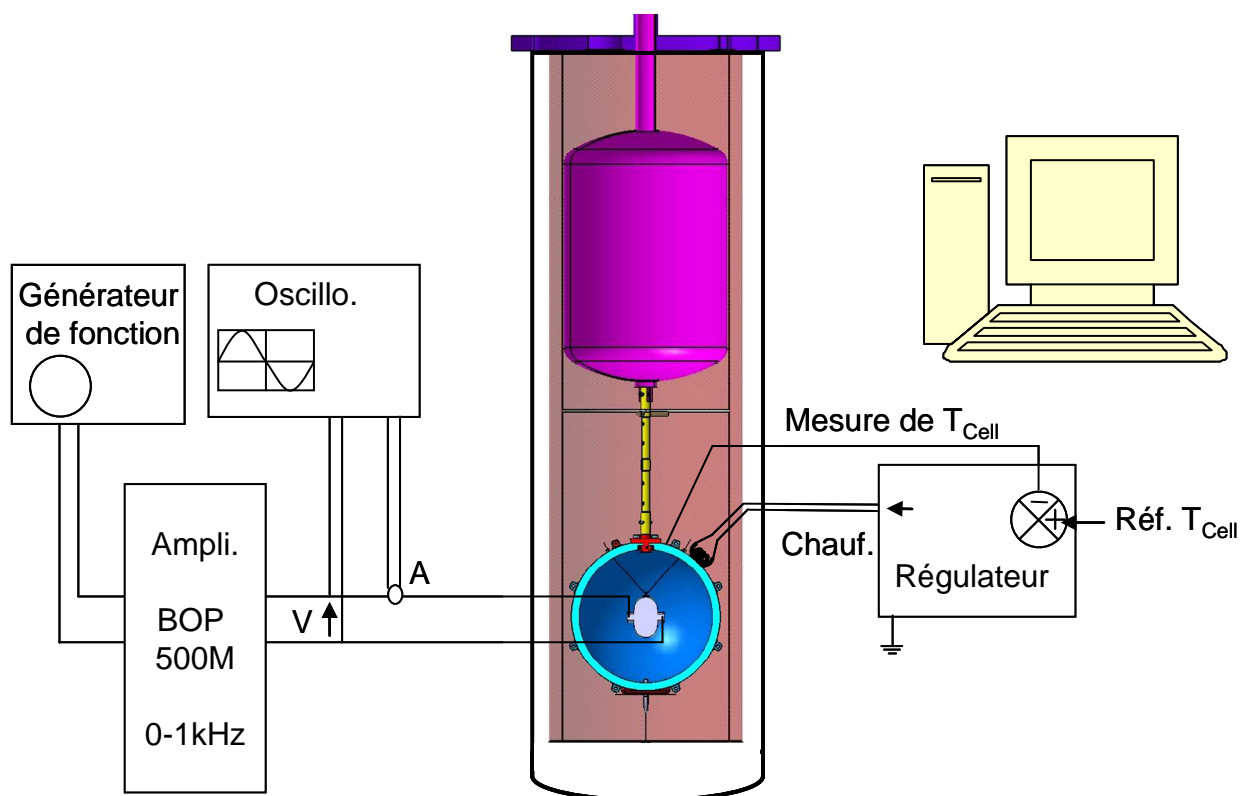


Figure 86 : Schéma de connexion des différents éléments de mesure du dispositif expérimental

11.2. Caractéristiques de l'alimentation du composant de référence

Le système d'alimentation du composant électrique est constitué d'un amplificateur de puissance et d'un générateur de fonction. L'amplificateur de puissance est de type Bipolar Operational Power Supply/Amplifier Model BOP 500M® fournie par KEPCO INC [Kepco2002]. Suivant le mode (stabilisateur de tension ou de courant), le BOP 1000M® a une tension et un courant de sortie variant respectivement de -1000 V à +1000 V, et de -40 mA à +40 mA, soit une puissance maximale à la sortie de 40 W.

Les signaux en sortie de notre générateur peuvent être continus ou alternatifs de forme sinusoïdale, triangulaire ou carrée avec variation du rapport cyclique de la tension mise en jeu. L'alimentation du composant testé peut également être réalisée sous tension impulsionnelle. Un oscilloscope à deux voies de type Philips 3350A 60MHz 100S/s permet de visualiser les signaux aux bornes du composant à tester.

11.3. Résultats et analyse

11.3.1. Incertitude théorique sur la mesure de puissance dissipée

Nous avons montré par modélisation que la variation de la puissance sur la cellule de mesure due à l'influence du milieu extérieur au calorimètre, était en théorie de $2,9 \text{ mW K}^{-1}$ hors régulation. Dans les conditions idéales (i.e. température du milieu ambiant constante), la puissance dissipée par un composant est déterminée expérimentalement à partir de la relation (161).

$$P_{GEN} = P_0 - P_1 = R_{FIL} (I_0^2 - I_1^2) \quad (161)$$

où R_{FIL} est la résistance électrique équivalente des fils chauffants insérés dans la cellule ; elle est identique entre les deux phases de mesure. I_0 et I_1 sont respectivement les courants électriques traversant la résistance R_{FIL} dans l'état OFF (composant hors tension) et dans l'état ON (composant sous tension).

L'incertitude relative sur la puissance thermique mesurée est calculée à partir de la relation (162).

$$\frac{\delta P_{GEN}}{P_{GEN}} = \frac{\delta R_{FIL}}{R_{FIL}} + 2 \left(\frac{\delta I_0}{I_0} + \frac{\delta I_1}{I_1} \right) \quad (162)$$

La valeur de R_{FIL} reste constante durant les deux phases de mesure d'où $\delta R_{FIL} = 0$. Le courant maximal dans la résistance électrique R_{FIL} ne dépasse pas 0,5 A, or la précision donnée par le PTC10 sur ce courant est de $\pm 0,1$ mA dans la gamme 0,1 A à 0,5 A. La précision sur la puissance thermique dissipée par un composant et mesurée par le calorimètre dans cette gamme de courant, est dans le pire des cas égale à 0,4 %, en théorie.

Pour les courants compris dans la gamme 0,01 A à 0,1 A, cette précision est meilleure que 0,4% en théorie.

Cependant, l'incertitude donnée sur le courant ne tient pas compte de l'inertie thermique de l'élément à réguler, cette dernière étant susceptible de conduire à d'importantes fluctuations de la puissance de régulation. L'incertitude calculée ici pourrait être plus importante avec notre cellule qui représente une masse de cuivre de 10 kg.

11.3.2. Précision obtenue expérimentalement

Les mesures expérimentales des pertes par effet Joule dans le composant purement résistif réalisées avec un support d'accrochage de la cellule en acier inoxydable, sont présentées dans le Tableau 15.

Une comparaison est effectuée entre la puissance thermique mesurée P_{mes} et la puissance générée dans le composant par effet Joule P_{inj} (P_{inj} : déterminée à partir de la loi d'Ohm). De ces écarts, nous déterminons ainsi la précision du dispositif calorimétrique.

Dans nos expériences la tension d'alimentation du composant ne dépasse pas 32,5 V et la précision sur cette tension est de 0,5 %. La précision relative sur la puissance injectée est par conséquent de 1 % dans toute la plage de température de mesure.

Les écarts relatifs entre P_{inj} et P_{mes} augmentent généralement avec la diminution de la puissance générée dans le composant résistif.

Ainsi, pour une puissance dissipée de 13,7 mW l'écart entre P_{inj} et P_{mes} est inférieur à 13 % de la puissance injectée pour des températures comprises entre -30 °C et +80 °C, la précision correspondante à cette gamme de température est donc de ± 13 %. A +90 °C et +100 °C, cet écart devient égal à 19,7 % et la précision correspondante est donc inférieure à ± 20 %.

Température de la cellule [°C]	P_{inj} [mW]	P_{mes} [mW]	Précision de P_{inj} [mW]	Ecart [%] de $ P_{inj} - P_{mes} /P_{inj}$
-30	13,7	15	0,14	9,48
	63	65	0,63	3,2
	103,5	101	1,03	2,4
	200,7	195	2	2,8
-20	13,7	13	0,14	5,1
	64,2	61	0,64	4,98
	106	103	1,06	2,83
	201,3	200	2,01	0,64
-10	13,7	12	0,14	12,4
	105,28	102	1,05	3,1
	501,6	488	5,01	2,7
	854,8	833	8,55	2,55
0	13,7	14	0,14	2,19
	101,3	98	1,01	3,26
	500,7	494	5	1,34
	1000,58	978	10	2,26
10	13,7	13	0,14	5,1
	101,3	97	1,01	4,24
	505,7	500	5,06	1,13
	1000,58	985	10	1,56
20	13,7	12	0,14	12,4
	103,3	100	1,03	3,19
	503,4	496	5,03	1,47
	1005,5	998	10,05	0,74
30	13,7	13	0,14	5,1
	103,8	103	1,04	0,77
	503,4	497	5,03	1,27
	1005,5	996	10,05	0,94
40	13,7	15	0,14	9,49
	103,8	100	1,04	3,66
	503,4	494	5,03	1,87
	1005,5	991	10,05	1,44

50	13,7	14	0,14	2,19
	103,8	97	1,04	6,55
	503,4	493	5,03	2,06
	1005,5	992	10,05	1,34
60	13,7	14	0,14	2,19
	103,8	102	1,04	1,73
	503,4	498	5,03	1,07
	1005,5	989	10,05	1,6
70	13,7	14	0,14	2,19
	103,8	103	1,04	0,77
	503,4	501	5,03	0,48
	1005,5	1000	10,05	0,55
80	13,7	12	0,14	12,4
	103,8	95	1,03	8,48
	503,4	487	5,03	3,26
	1005,5	984	10,05	2,14
90	13,7	11	0,14	19,7
	103,8	92	1,04	11.41
	503,4	482	5,03	4.25
	1005,5	980	10,05	2.53
100	13,7	11	0,14	19,7
	103,8	92	1,04	11.41
	503,4	480	5,03	4,65
	1005,5	975	10,05	3

Tableau 15 : Résultats des mesures de puissance thermique dissipée par le composant électrique résistif pour différentes températures imposées à la cellule de mesure. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

L'écart relatif pour une puissance dissipée de 103,8 mW reste inférieur à 5 % pour des températures comprises entre -30 et +70 °C excepté la mesure à +50 °C (6.26 %), la précision dans cette plage de température peut donc être estimée à ± 5 %. Cet écart relatif augmente au-delà de +70 °C pour prendre des valeurs de 8,48 % à +80 °C et 11,4 % à +90 °C et à +100 °C, la précision correspondante à ces températures est donc égale, dans le pire des cas à $\pm 11,4$ % pour une puissance dissipée de 103,3 mW.

Pour une puissance dissipée de 503,4 mW, l'écart relatif est quasiment égal à 2 % pour des températures inférieures à +70 °C (précision égale à ± 2 %). Il prend des valeurs de 3,26 %, 4,25 % et 4,65 % aux températures respectivement égales à +80 °C, +90 °C et +100 °C (précision inférieure à $\pm 4,7$ %).

Les écarts relatifs d'une puissance dissipée de 1005,5 mW restent inférieurs à 2,5 % dans toute la gamme de température de mesure excepté la mesure à +100 °C (3 %). La précision correspondante à ces mesures est donc inférieure à $\pm 2,5$ % hormis la mesure à +100°C où cette précision vaut ± 3 %.

Ainsi, comme on peut le voir sur la Figure 87 et la Figure 88, l'écart relatif diminue avec l'augmentation de la puissance dissipée par le composant, et donc plus la puissance dissipée sera importante plus la mesure sera précise.

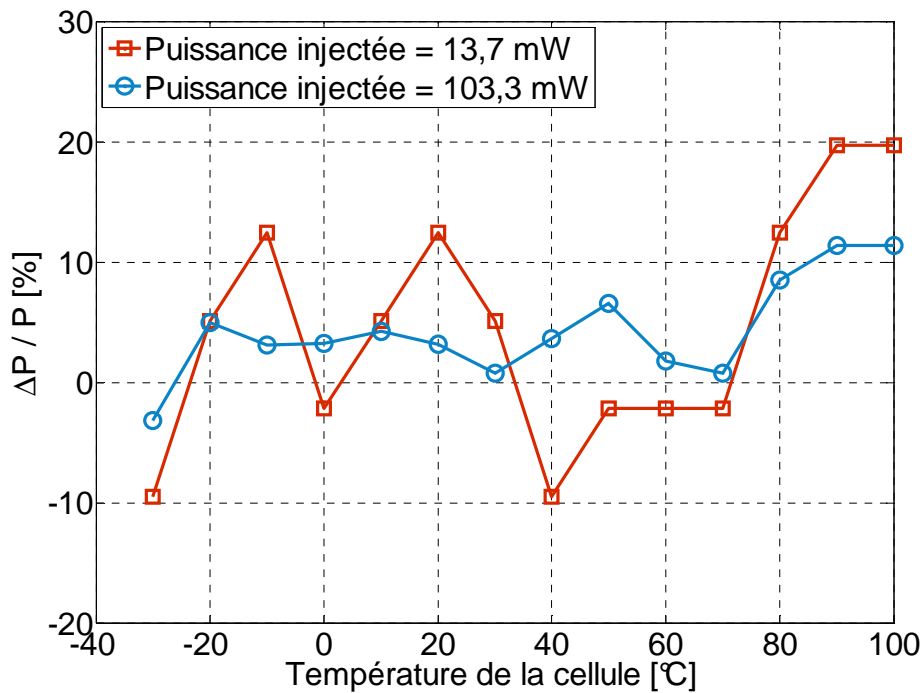


Figure 87 : Ecarts relatifs $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour de « faibles » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

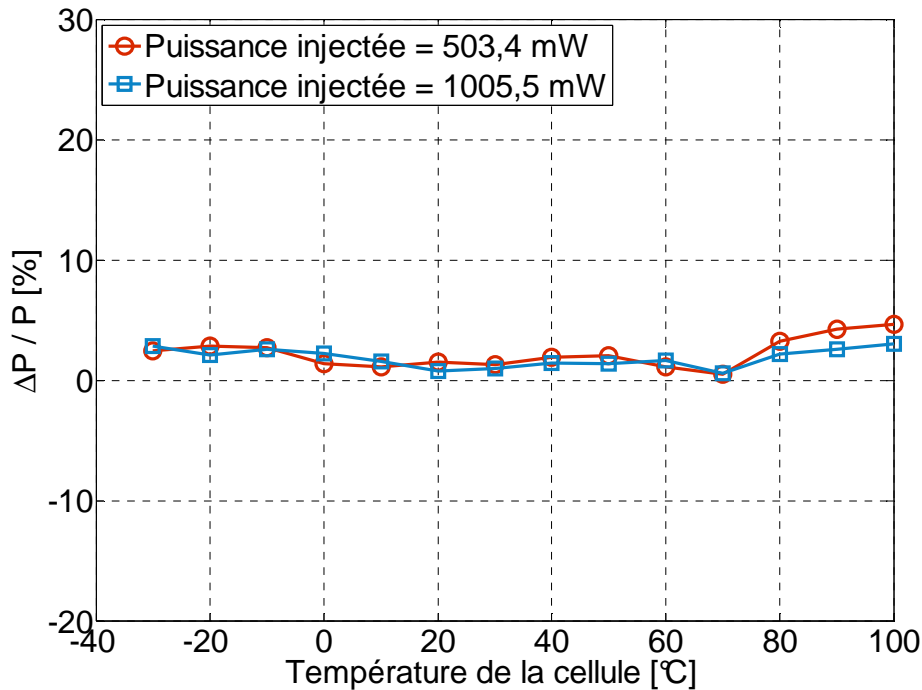


Figure 88 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{mes}$ pour de « fortes » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

Les précisions de mesures du dispositif calorimétrique avec le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote en acier inoxydable sont résumées dans le Tableau 16.

Puissance dissipée [mW]	Précision (T : température de la cellule en °C)
13,7	±13 % pour $-30 < T < +80$ et ±19,7 % pour $T > +80$
103,3	±5 % pour $-30 < T < +70$ et ±11,7 % pour $T > +70$
503,4	±2 % pour $-30 < T < +70$ et ±4,7 % pour $T > +70$
1005,5	±2,5 % pour $-30 < T < +100$ et 3 % pour $T = +100$

Tableau 16 : Résumé des précisions obtenues pour chaque puissance mesurée avec le support d'accrochage de la cellule en acier inoxydable 304 L

11.3.3. Influence de la température sur la puissance mesurée

L'influence de la température de la cellule sur la puissance mesurée par le calorimètre, est mise en évidence par la Figure 89.

Les mesures sont réalisées en fonction de la température mesurée par la sonde sur laquelle la cellule de mesure est régulée, pour différentes puissances générées par effet Joule dans le composant égales à : 13,7 mW, 103,3 mW, 503,4 mW et 1005,5 mW. Le support d'accrochage de la cellule est ici en acier inoxydable 304 L.

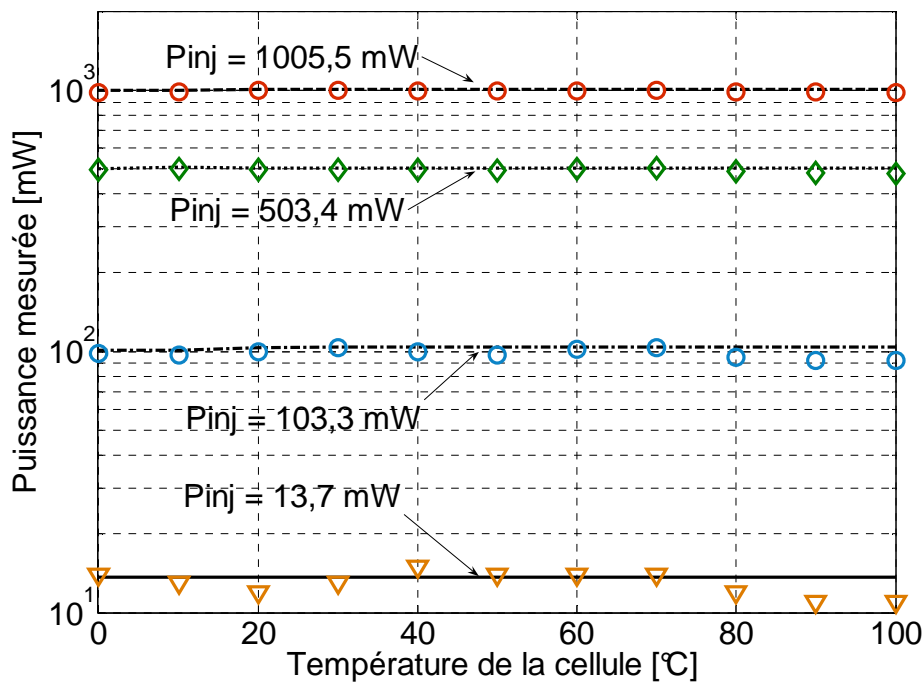


Figure 89 : Evolution des puissances thermiques mesurées en fonction de la température de la cellule pour différentes puissances injectées. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

Les résultats montrent un comportement quasi-indépendant de la température de la cellule de mesure. Pour de faibles puissances dissipées (13,7 mW et 103,3 mW), on observe une légère chute de la puissance mesurée entre +80 °C et +100 °C.

Afin de comprendre la chute observée, la Figure 90 montre l'évolution de la puissance de régulation de la cellule à une température de +90 °C.

L'évolution de la puissance de régulation de la cellule à +90 °C montre d'importantes oscillations intermittentes. Ces fluctuations apparaissent à partir de +80 °C. Elles sont de l'ordre de ± 20 mW à 80 °C, ± 30 mW à 90 °C et de ± 40 mW à 100 °C. Elles sont donc supérieures à celles données par le constructeur (± 10 mW) [Stanford2008] et observées aux plus faibles températures. L'influence de ces fluctuations sur la précision des puissances P_0 et P_1 (principe de mesure du calorimètre) pourraient donc expliquer la chute de la puissance mesurée aux températures supérieures à +80 °C.

Toutefois, pour des puissances dissipées importantes telles que 503,4 mW et 1005,5 mW, l'influence de la température entre +80 °C et +100 °C est beaucoup plus atténuée, la puissance dissipée étant importante devant les fluctuations de la régulation. Les chutes de la puissance mesurée aux températures de +80 °C, +90 °C et +100 °C ne sont donc pas attribuées au calorimètre mais plutôt au fonctionnement électronique du régulateur de température de la cellule.

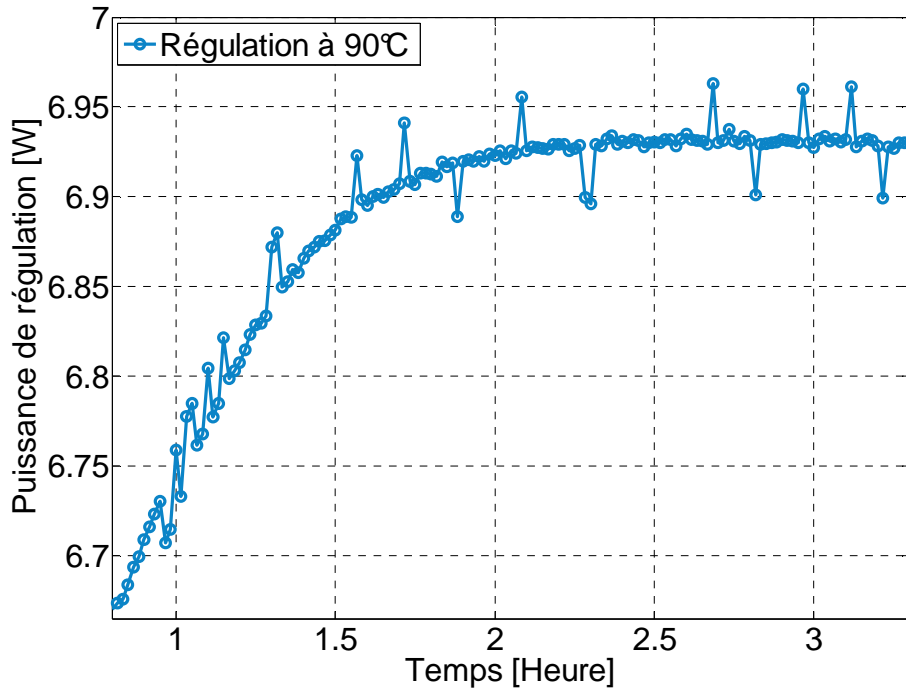


Figure 90 : Evolution de la puissance fournie par la régulation lorsque l'on passe d'une température de consigne de +80°C à +90 °C. Le compo sant est inactif et Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

11.3.4. Influence de la nature du support d'accrochage de la cellule

Afin de mettre en évidence l'influence du matériau constituant le support d'accrochage de la cellule de mesure sur la précision des mesures du calorimètre, nous avons effectué une série de mesures de la puissance injectée dans le composant résistif en fonction de la température imposée à la cellule par la régulation.

Pour ce rendre compte de la précision, nous avons observé l'écart relatif entre la puissance injectée par le composant P_{inj} et la puissance mesurée P_{mes} ($(P_{inj}-P_{mes}) / P_{inj}$). Les supports utilisés ici sont en cuivre et en époxy fibre de verre.

i. Support en cuivre Cu-b1

La Figure 91 montre le comportement de l'écart relatif pour des puissances injectées de 8 mW et 100 mW.

Pour une puissance injectée de 8 mW, on observe que les écarts sont compris dans une plage de $\pm 75\%$ excepté la mesure faite à +25 °C où l'écart est de -150 %. Ces écarts montrent que les mesures d'une telle puissance ne sont pas possibles avec un support d'accrochage en cuivre.

Pour une puissance injectée d'environ 100 mW, les écarts relatifs sont compris dans une gamme de $\pm 24\%$. Cette imprécision est plus importante que celle observée au paragraphe 11.3.2 avec un support d'accrochage de la cellule en acier inoxydable ($\pm 5\%$).

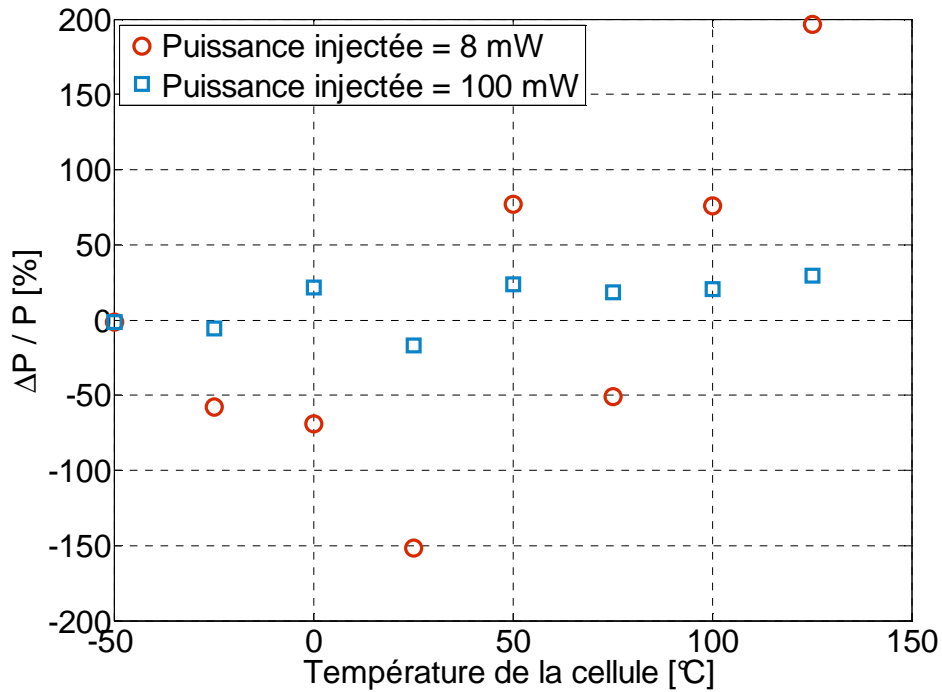


Figure 91 : Ecarts relatifs $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour de « faibles » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en cuivre Cu-b1

La Figure 92 montre le comportement de l'écart relatif pour des puissances injectées d'environ 500 mW et 1000 mW.

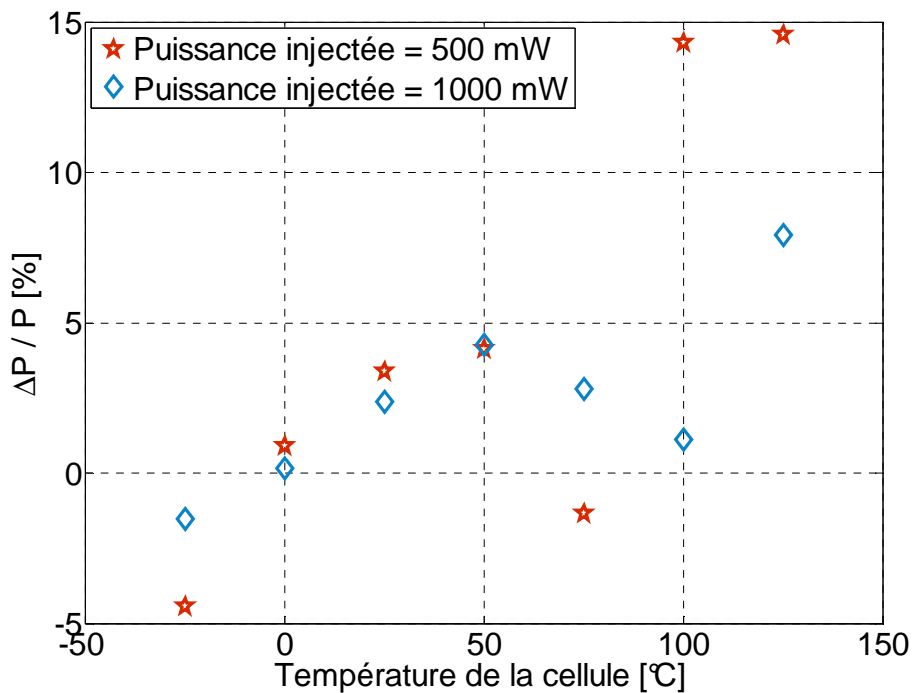


Figure 92 : Ecarts relatifs $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour de « fortes » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en cuivre Cu-b1

On observe que pour une puissance injectée de 500 mW l'écart relatif ne dépasse pas $\pm 4,5\%$ pour les températures inférieures à $+100\text{ }^\circ\text{C}$, au-delà de cette température l'écart augmente et devient égale à $14,5\%$. Et pour une puissance de 1000 mW l'écart relatif de puissance est de $4,3\%$ pour les températures d'essai inférieures ou égales à $+100\text{ }^\circ\text{C}$. Il prend une valeur de 8% à $+125\text{ }^\circ\text{C}$.

Les précisions de mesures du dispositif calorimétrique avec le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote en cuivre sont résumées dans le Tableau 17.

Puissance dissipée [mW]	Précision (T température de la cellule en $^\circ\text{C}$)
8	$\pm 75\%$ pour $-50 < T \leq +100$ et $\pm 200\%$ pour $T > +125$
103,3	$\pm 24\%$ pour $-50 < T \leq +100$ et $\pm 30\%$ pour $T = +125$
503,4	$\pm 4,5\%$ pour $-50 < T < +100$ et $\pm 14,5\%$ pour $T \geq +100$
1005,5	$\pm 4,3\%$ pour $-50 < T \leq +100$ et 8% pour $T = +125$

Tableau 17 : Résumé des précisions obtenues pour chaque puissance mesurée avec le support d'accrochage de la cellule en cuivre

ii. Support en époxy fibre de verre

La Figure 93 montre l'évolution de l'écart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour différentes puissances injectées en fonction de la température de la cellule de mesure, mesurée au point de régulation.

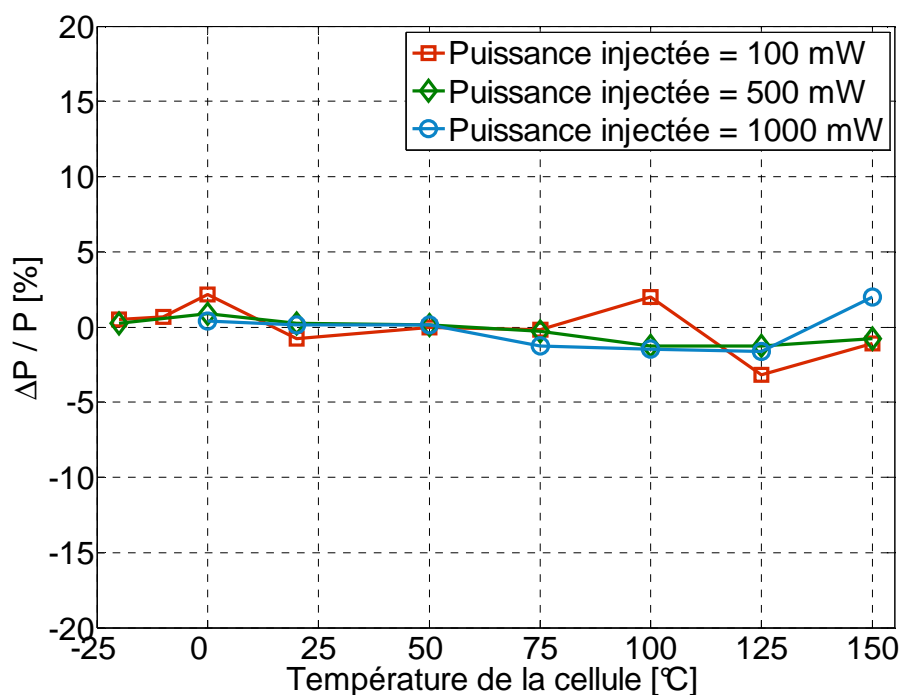


Figure 93 : Ecarts relatifs $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour des puissances de l'ordre de 100 mW, 500 mW et 1000 mW injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en époxy fibre de verre

On observe que l'écart relatif est quasiment constante dans la gamme de température allant de -20 °C à +125 °C pour toutes les puissances injectées. Dans cette gamme de température, l'écart relatif observé est inférieur à ±2,1 % pour une puissance dissipée de l'ordre de 100 mW. Cet écart est inférieur à ±1,3 % pour une puissance injectée de 500 mW dans toute la gamme de température allant de -20 °C à +150 °C. L'écart relatif est inférieur à ±2 % pour une puissance injectée de l'ordre de 1000 mW dans la même gamme de température.

Les précisions de mesures du dispositif calorimétrique avec le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote en époxy fibre de verre sont résumées dans le Tableau 18.

Puissance dissipée [mW]	Précision (T température de la cellule en °C)
13,7	±5 % pour -20 < T < +75 et ±11,5 % pour T > +75
103,3	±2,1 % pour -20 < T < +150
503,4	±0,9 % pour -20 < T ≤ +100 et ±1,3 % pour T > +100
1005,5	±1,3 % pour -20 < T ≤ +70 et 2 % pour T ≥ +80

Tableau 18 : Résumé des précisions obtenues pour chaque puissance mesurée avec le support d'accrochage de la cellule en époxy fibre de verre

iii. Synthèse de l'influence du support d'accrochage de la cellule

La Figure 94 présente le comportement de l'écart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ à différentes températures de la cellule de mesure, pour des matériaux constituant le support d'accrochage de la cellule en époxy fibre de verre, en acier inoxydable et en cuivre. La puissance injectée par le composant est dans les trois cas (époxy fibre de verre, acier inoxydable et cuivre) de l'ordre de 100 mW.

On observe que l'écart relatif est plus important avec un support d'accrochage en cuivre (écart relatif compris dans la gamme ±24 %) et en acier inoxydable (écart relatif compris dans la gamme ±11,4 % dans le pire des cas).

En revanche, le support en époxy fibre de verre présente un écart faible (±2,1 % dans toute la gamme de température (-25 °C et +150 °C) impliquant ainsi une amélioration de la précision du calorimètre. Cette amélioration de la précision avec le support en époxy fibre de verre est également observée avec les autres puissances mesurées (i.e. 13,7 mW, 500 mW et 1000 mW).

L'écart relatif semble donc augmenté selon que le matériau constitutif du support de la cellule est bon conducteur thermique.

En effet, on observe d'importantes fluctuations de la puissance de régulation de la cellule selon que le support d'accrochage est bon conducteur thermique. Ces fluctuations, s'intensifient avec l'augmentation de la température imposée sur la cellule provoquant ainsi d'importantes incertitudes sur la mesure de P_0 et P_1 (principe de mesure).

Aussi, un support « bon » conducteur thermique favorise les fuites thermiques à travers le support d'accrochage et diminue donc la sensibilité de la cellule de mesure aux variations de température qui sont détectables par la régulation.

En conséquence, nous gagnons en gamme de puissance et en plage de températures mesurables avec un support d'accrochage « bon » conducteur thermique, cependant ces avantages sont limités par la précision de mesure du calorimètre.

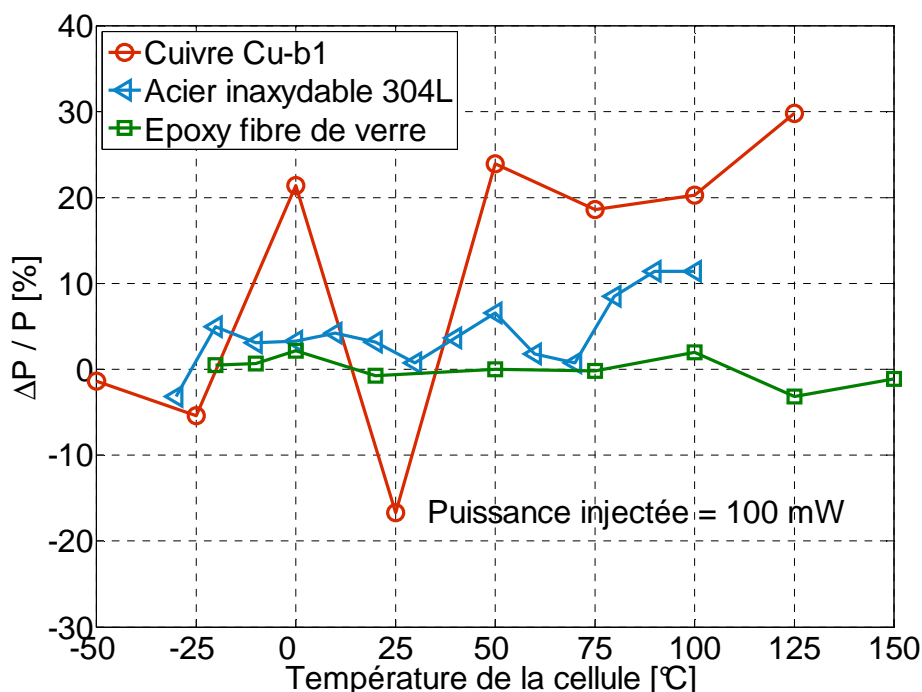


Figure 94 : Ecarts relatifs $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ à différentes températures de la cellule mesurées au point de régulation pour différents matériaux constituant le support d'accrochage en époxy fibre de verre, en acier inoxydable et en cuivre. La puissance injectée par le composant résistif est de l'ordre de 100 mW

Le support d'accrochage de la cellule en matériau composite (époxy et de fibre de verre) permet donc d'améliorer considérablement la précision de mesure du calorimètre.

Le Tableau 19 donne le résumé de la précision (dans le pire des cas) de mesure de la puissance injectée par le composant purement résistif dans la gamme de température allant de -30 °C à +100 °C pour différents supports de la cellule considérés.

Puissance injectée [mW]	Précision [%] dans la gamme -30 °C à +100 °C		
	Epoxy fibre	Acier inox 304 L	Cuivre Cu-b1
14	±11,5	±19,7	xxx
100	±2,1	±11,7	±24
500	±1,3	±4,7	±4,5
1000	±1,3	±3	±4,3

Tableau 19 : Précisions de mesure (dans le pire des cas) de la puissance injectée obtenues pour des supports d'accrochage de la cellule en époxy fibre de verre, en acier inoxydable 304 L et en cuivre Cu-b1

11.3.5. Influence de l'émissivité du composant sur la puissance mesurée

Dans le modèle théorique (Chapitre IV, § 2.5.2), on a montré que l'émissivité d'un composant modifiait le ratio du flux rayonné sur le flux total émis par ce composant, cela a pour conséquence d'amplifier ou non des inhomogénéités thermiques sur la cellule de mesure.

En effet, un composant de faible émissivité limite ses échanges de chaleur par radiation et favorise donc les fuites thermiques par conduction à travers le support et les amenées de courant. Or ces éléments sont susceptibles de créer des inhomogénéités thermiques sur la cellule et de dégrader par la même occasion la précision de mesure de notre calorimètre.

Afin de vérifier si l'émissivité du composant a un impact sur la puissance mesurée, nous avons réalisé différentes expériences en recouvrant la surface latérale du composant, avec la peinture noire Nextel Velvet Coating 811-21®, du scotch polyimide (kapton) ou du scotch cuivre.

La Figure 95, présente les points de mesure de la puissance injectée par le composant aux températures respectives de 0 °C, +30 °C et +60 °C, imposée à la cellule de mesure. La puissance injectée P_{inj} est fixée dans ce premier cas à 103,3 mW.

La comparaison des points de mesure à +30 °C et à +60 °C montre que la puissance thermique dissipée avec une surface recouverte de scotch cuivre est moins importante que celle dissipée par une surface recouverte de scotch kapton ou peinte en noire. Cette tendance est normale puisque, l'émissivité thermique du scotch cuivre est beaucoup plus faible que celle du kapton (matériau diélectrique) et de la peinture noire.

Cependant, le point de mesure à 0 °C présente des résultats contraires, c'est-à-dire, la puissance dissipée avec le scotch cuivre est plus importante.

Les écarts entre les différents points à une température donnée (Figure 95) ne dépassent pas 3 mW (< 3 % de P_{inj}), la précision de mesure à $P_{inj} = 103,3$ mW étant de 5 % pour les températures considérées (0 °C, +30 °C et +60 °C), les écarts observés entre les courbes ne sont donc pas significatifs.

Pour une puissance injectée égale à 503,4 mW (Figure 96) aux mêmes températures qu'à la Figure 95, on observe que la puissance dissipée par le scotch cuivre reste systématiquement en-dessous de celle dissipée avec le scotch kapton ou avec la peinture noire. Le scotch cuivre limite donc la dissipation de la puissance mesurée.

Cependant, la puissance dissipée avec le scotch kapton (émissivité de l'ordre de 0,78) est anormalement supérieure à celle dissipée avec la peinture noire (émissivité de l'ordre de 0,97) à +30 °C. Cette tendance se confirme avec une puissance injectée de 1005,5 mW (Figure 97). Mais l'écart entre ces deux puissances reste inférieur à la précision de mesure à cette température (± 2 % pour 503,4 mW et 2,5 % pour 1005,5 mW). L'écart observé ne relève donc pas forcément de l'influence de l'émissivité.

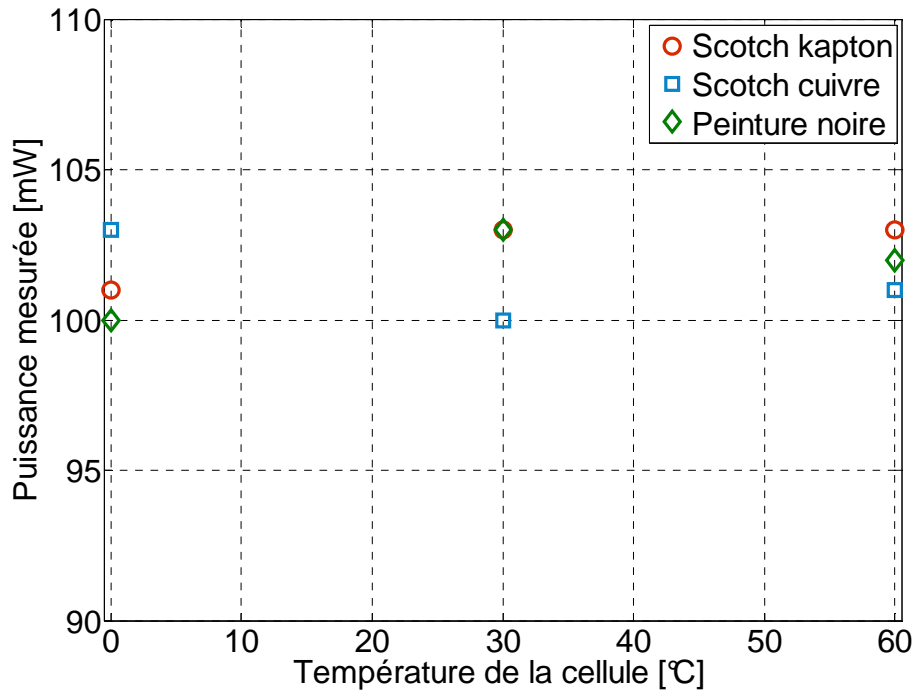


Figure 95 : Influence de l'émissivité de la surface externe du composant pour différentes températures imposées à la cellule. La puissance injectée dans le composant est égale à 103,3 mW. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

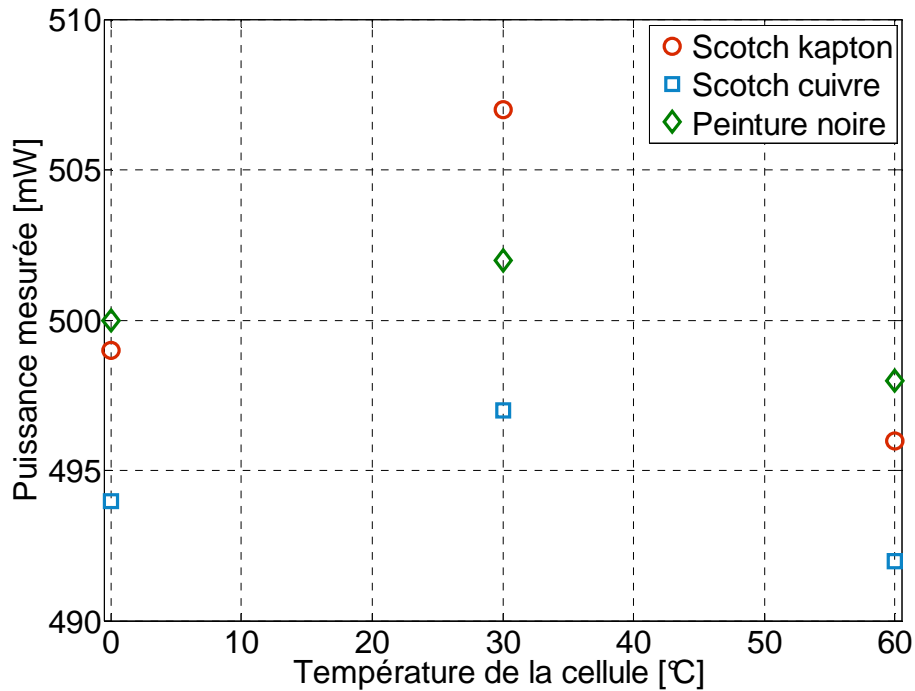


Figure 96 : Influence de l'émissivité de la surface externe du composant pour différentes températures imposées à la cellule. La puissance injectée dans le composant est égale à 503,4 mW. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

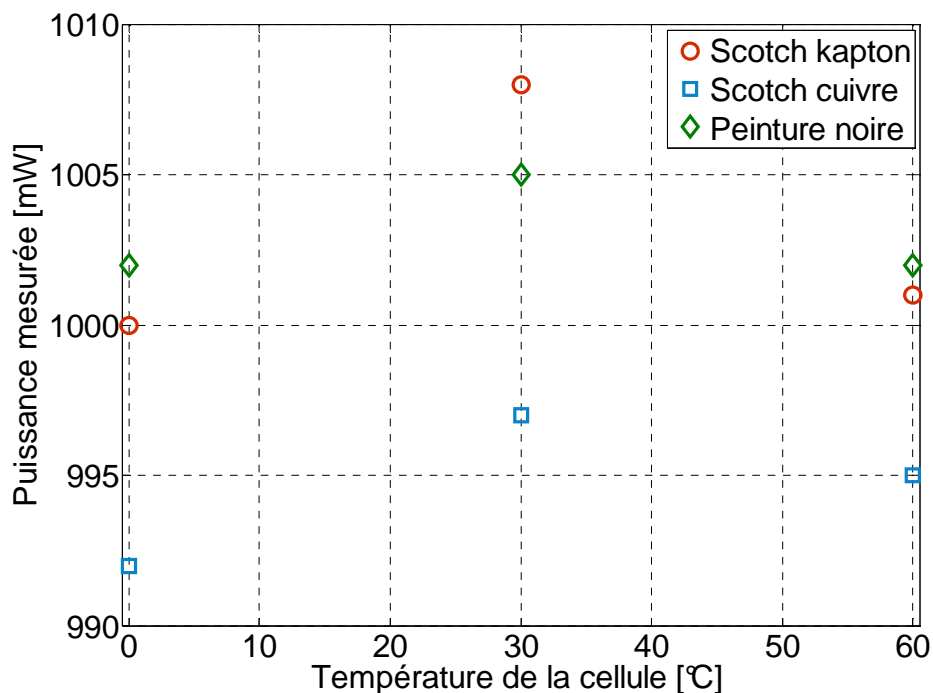


Figure 97 : Influence de l'émissivité de la surface externe du composant pour différentes températures imposées à la cellule. La puissance injectée dans le composant est égale à 1005,5 mW. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L

L'émissivité du composant a donc une faible influence sur les puissances que nous avons mesurées et ses conséquences sur l'homogénéité thermique de la cellule semblent donc limitées. Cependant nous n'avons nul doute que les faibles émissivités ont un impact plus significatif sur la température de surface du composant testé.

12. Etude comparative des pertes dans un condensateur

Nous proposons de terminer ce travail de validation, par l'étude comparative des pertes de puissance produites par un condensateur. Pour ce faire nous envisageons de mesurer les pertes en fonction de la fréquence d'alimentation du condensateur. Puis nous comparerons ce résultat à ceux obtenus à partir d'un analyseur d'impédance haute tension : de type Programma IDA 200®.

Le condensateur qui sera éprouvé est de type PEK235 dimensionné pour fonctionner sous une tension et un courant nominale de 330 V-12.5 A ; la capacité typique à 1kHz/ 25 °C est de 481 nF.

Nous espérons pouvoir communiquer les conclusions de cette expérience à l'occasion de la soutenance orale de ce mémoire de thèse.

13. Conclusion

Pour valider les différentes hypothèses du modèle analytique des échange de chaleur présenté au Chapitre III, une caractérisation en régime stationnaire et dynamique des différents éléments, allant de l'instrumentation aux principaux constituants du calorimètre a été menée.

Ainsi, les mesures effectuées à l'aide de nos capteurs Pt100 en régime permanent et transitoire ont montré que les écarts de température entre les différentes sondes restaient de l'ordre du dixième de degrés Celsius.

L'analyse de la réponse thermique de la cellule de mesure a été observée sans régulation et avec la régulation.

Ainsi, en absence de régulation, la cellule de mesure présente une réponse thermique lente lorsque son support d'accrochage est en époxy fibre de verre. La réponse thermique de la cellule en présence de régulation quant à elle a montré que notre calorimètre présente une maniabilité satisfaisante.

L'amélioration de la réponse thermique de la cellule sans régulation a été menée à l'aide des supports de la cellule en matériaux ayant une meilleure conductivité thermique que celle de l'époxy fibre de verre. Les matériaux utilisés ont été respectivement l'acier inoxydable 304 L, l'aluminium 6060 et le cuivre Cu-b1. Cette étude a montré que la dynamique thermique de la cellule évolue avec la conductivité thermique du matériau constituant son support d'accrochage.

Les évolutions de la puissance de régulation et de la température de la cellule mesurée au point de régulation lors de la mesure des pertes de puissance générée par un composant purement résistif ont été mises en évidence avec le support d'accrochage de la cellule en acier inoxydable 304 L. Les résultats ont montré que les fluctuations de la puissance restaient comprises dans une gamme de ± 10 mW et celle de la température étaient de l'ordre de $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ °C.

Pour limiter l'influence des fluctuations de la puissance de régulation dans la détermination de P_0 et P_1 , une moyenne glissante de ces grandeurs a été effectuée. Celle-ci a permis d'améliorer la précision de ± 10 mW à ± 1 mW quelle que soit la température imposée sur la cellule.

Lors de la conception, des efforts particuliers ont été faits pour limiter au maximum les gradients thermiques sur divers éléments du dispositif. Nous avons observé ces gradients thermiques sur la cellule de mesure, sur l'écran vertical E et sur l'enceinte à vide.

Sur la cellule de mesure, la simulation par éléments finis sur Flux2D® a montré que les sondes Pt100 collées sur la cellule ne peuvent pas être influencées par le gradient thermique créé par le fil chauffant. Aussi, les variations de température dues à la génération de puissance dans le fil chauffant ne dépassent pas 0,05 °C sur la surface externe et 0,08 °C sur la surface interne en théorie.

Expérimentalement, l'image thermique prise sur la surface interne de la cellule de mesure a montré un écart de température conséquent entre la position du fil chauffant et la cellule proprement dite. L'importance de ces écarts a été directement attribuée au mauvais contact thermique entre le fil chauffant et la paroi de la cellule et à la présence de cavités gazeuses dans la rainure contenant le fil chauffant lors du remplissage de cette dernière avec de la laque d'argent.

Les gradients de température créés sur la cellule de mesure par son support d'accrochage au réservoir d'azote ont été observés. Ainsi, on a montré que les écarts de température sur la demi-sphère fixe et sur la demi-sphère mobile restaient inférieurs au dixième de degrés pour tous les matériaux testés.

Par ailleurs les capteurs de température collés sur l'écran verticale E et sur l'enceinte à vide ont montré des faibles écarts de température sur ces deux

constituants. Ainsi, l'hypothèse de surface isotherme prise dans le modèle pour ces deux éléments n'est pas aberrante.

La validation du calorimètre a été effectuée à partir de la mesure de la puissance dissipée par effet Joule dans un composant purement résistif avec les supports d'accrochage de la cellule en époxy fibre de verre, en acier inoxydable 304L et en cuivre Cu-b1. L'analyse des résultats a permis de dégager la précision de mesure du dispositif calorimétrique pour chaque support d'accrochage. Ces résultats montrent par ailleurs que la précision de mesure est meilleure avec un support « mauvais » conducteur thermique (époxy fibre de verre).

Nous avons également observé l'influence de l'émissivité du composant. Les résultats en accord avec le modèle ont montré que l'influence de l'émissivité du composant testé est négligeable compte tenu de la précision de mesure du calorimètre.

La puissance de régulation, qui représente la puissance maximale mesurable que peut dissiper un composant à une température donnée, a été quantifiée en fonction de la température imposée sur la cellule de mesure. Les résultats ont montré que le support de la cellule en époxy fibre de verre ne permet pas de recouvrir la gamme de température envisagée.

Afin d'améliorer l'étendue de mesure des puissances mesurable et la plage de température du calorimètre, la puissance de régulation a également été mesurée avec des supports ayant une meilleure conductivité thermique que l'époxy fibre de verre. Les résultats ont montré des avancements sur la gamme de température et les puissances mesurables. Toutefois, les mesures de pertes de puissance avec ces supports d'accrochage ont démontré une dégradation de la précision de mesure qui s'intensifie aux faibles pertes de puissance.

14. Références

[Emerson2004] Emersion & Cuming, Stycast® 2850 FT “Two component versatile epoxy encapsulant with high thermal Conductivity”, Technical data, *National starch & Chemistry company*, 2004.

[Kepco2002] Kepko® BOP 500M “the power supplier™”, 2002.

[Stanford2008] Stanford Research Systems, "PTC10 programmable temperature controller", *user manual*, version 1.1, 2008.

[Sparrow1962] Sparrow, E.M.; Miller, G.B.; and Jonsson, V.K., 1962, "Radiative effectiveness of annular- finned space radiators, including mutual irradiation between radiator elements," *J. Aerospace Sci.*, vol. 29, no. 11, pp. 1291-1299.

[Xiao2007] Chucheng Xiao, Gang Chen, Willem. G. H. Odendaal, “Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems”, *in Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol.43 Issue 3 pp. 657-664, May-June 2007

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse s'inscrit dans le cadre général du développement d'un dispositif de mesure de faibles pertes dans les composants de puissance. Poussé par les récents progrès vers l'intégration des composants de puissance avec des densités de puissance et des fréquences de fonctionnement de plus en plus élevées, l'estimation précise des pertes de puissance est devenue très importantes pour la gestion thermique et pour assurer un fonctionnement fiable des composants.

Notre objectif a été de concevoir et de réaliser un dispositif de mesure permettant de caractériser de faibles pertes de puissance dans les composants électriques. Ce dispositif a été conçu pour travailler dans une gamme de température allant de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec des pertes de puissance mesurées allant de quelques milliwatts à plusieurs watts. Les tensions appliquées à une éprouvette testée peuvent atteindre 3 kV RMS et 5 kV DC, de formes quelconques et avec des fréquences de travail pouvant aller jusqu'au MHz. Notre dispositif a également été pensé de façon à permettre la mesure des pertes dans les composants de géométrie variée.

Le dispositif que nous avons conçu repose sur une méthode calorimétrique qui est mieux adaptée à la mesure des pertes de puissance que les méthodes électriques dont la précision se trouve forcément limitée en haute fréquence et à faible angle de perte.

Le principe de mesure de notre calorimètre est basé sur une mesure différentielle. Les pertes de puissance dissipées par un composant sous test sont mesurées comme la différence entre les puissances électriques fournies par une régulation de température (maintenant la cellule de mesure à une température fixée) avant et pendant la mise sous tension du composant. L'échange de chaleur entre le composant testé et la cellule de mesure se fait par rayonnement thermique afin de s'affranchir de la géométrie des composants. Dans l'architecture du calorimètre, les principales fonctions que nous avons mis en œuvre dans la construction du calorimètre sont : une source de chaleur, une source froide, un vecteur de chaleur et enfin un système d'isolation permettant de limiter des perturbations extérieures au calorimètre (Chapitre II). Cette architecture a été largement influencée par le travail de modélisation des échanges thermiques du calorimètre (Chapitre III). La réalisation de notre outil de mesure a été effectuée avec le support du Service d'Etude et de Réalisation d'Appareillage Scientifique de Grenoble (SERAS®).

L'analyse théorique a montré que les échanges thermiques par rayonnement sont bien prépondérants dans la cellule de mesure. La sensibilité théorique du dispositif calorimétrique a été illustrée par le modèle et montre qu'une puissance de 0.1 mW est mesurable à condition d'avoir des dispositifs ayant une résolution de 10^{-3} K. Des calculs en régime transitoire ont également été réalisés afin de pouvoir apprécier les dynamiques thermiques de chaque constituant du dispositif calorimétrique. En particulier, la cellule de mesure présente une dynamique satisfaisante lorsque son système d'accrochage est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre. Toutefois, il apparaît que cette dynamique peut être améliorée en utilisant pour ce support de la cellule, des matériaux de meilleures conductivités thermiques.

L'étude expérimentale en régime stationnaire puis dynamique des différents éléments, allant de l'instrumentation aux principaux constituants du calorimètre a été menée afin de valider les hypothèses du modèle analytique. Pour l'instrumentation,

les mesures effectuées à l'aide de nos capteurs Pt100 en régimes stationnaire et dynamique ont montré que les mesures réalisées par ces sondes sont justes au sens métrologique. L'analyse de la réponse thermique de la cellule de mesure a été appréciée sans régulation et avec régulation de température. Ainsi, en l'absence de régulation, nous avons mis en évidence l'influence du support d'accrochage de la cellule de mesure au réservoir d'azote liquide sur la dynamique thermique de la cellule. Cette étude a montré que la dynamique de la cellule est lente et qu'elle augmente avec la conductivité thermique de son support d'accrochage.

La réponse thermique de la cellule de mesure avec régulation a été observée afin d'apprécier la maniabilité et la précision de la régulation de la cellule de mesure. Cette analyse a montré, à l'instar des dispositifs isothermes, que la puissance de régulation mettait un temps assez long pour se stabiliser malgré que la température correspondante soit à l'équilibre. Lorsqu'elle est stabilisée, la puissance de régulation fluctue dans une fourchette de ± 10 mW pour des températures d'essai inférieures à 80 °C, lorsque le support d'accrochage de la cellule au réservoir d'azote est en acier inoxydable. Au-dessus +80 °C et avec le même support d'accrochage, on assiste à une augmentation des fluctuations de la puissance de régulation en fonction de la température. Aussi, l'évolution simultanée de cette puissance de régulation et de la température de la cellule lors de la génération de puissance dans un composant purement résistif a montré que les fluctuations de puissance demeurent à ± 10 mW sur la puissance et les fluctuations de température sont de $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ °C. Cette expérience a été effectuée pour une température de 30 °C imposée à la cellule de mesure.

Les fluctuations, de la puissance de régulation, ont pour conséquence, de dégrader la précision du dispositif calorimétrique. Afin de limiter l'influence de ces fluctuations dans la détermination des pertes, une moyenne glissante de la puissance de régulation a été effectuée, elle permet d'améliorer la précision à ± 1 mW quelle que soit la température d'essai.

Lors de la conception, des efforts ont été faits pour limiter au maximum les gradients thermiques sur la cellule de mesure. Les températures en différents points de la cellule de mesure ont été relevées et ont témoigné d'une homogénéité satisfaisante.

La puissance générée dans un composant testé doit naturellement être inférieure à la puissance de régulation nécessaire pour maintenir la cellule à une température d'essai donnée. Cette puissance de régulation a été quantifiée en fonction de la température imposée sur la cellule de mesure. Les résultats ont montré que la puissance de régulation, à une température d'essai donnée, augmente avec la conductivité thermique du support d'accrochage de la cellule. L'étendue de la température de mesure évolue également avec la conductivité thermique de ce support.

La validation de notre calorimètre a été réalisée à partir de la mesure de la puissance dissipée par effet Joule dans un composant purement résistif. La cellule de mesure était alors accrochée au réservoir d'azote d'abord par un support en acier inoxydable 304 L, puis en cuivre Cu-b1 et enfin en époxy fibre de verre. L'analyse des résultats a permis de dégager la précision de mesure du dispositif pour chaque type de support. Cette analyse montre que la précision demeure très satisfaisante, elle augmente avec la puissance injectée dans le composant testé et selon que le support de la cellule est « mauvais » conducteur thermique.

Il a été montré que la puissance mesurée était peu sensible à la température de la cellule.

Par ailleurs, l'influence de l'émissivité du composant testé sur la puissance mesurée a été mise en évidence. Les résultats sont en accord avec le modèle et ont montré que l'influence de l'émissivité du composant testé est négligeable au vu de la précision de mesure du calorimètre.

Les perspectives de ce travail son nombreuses.

A court terme, les plus importantes sont :

- Améliorer le dispositif d'alimentation des composants étalons afin de mieux estimer la précision de mesure du dispositif.
- Limiter les fluctuations de puissance de la régulation afin de mesurer plus précisément la puissance délivrée par cette dernière.
- Mettre en œuvre les fibres optiques pour d'accéder au spectre du rayonnement thermique afin de déterminer la température et l'émissivité du composant testé.
- Améliorer le programme d'acquisition des données afin d'extraire la puissance délivrée par la régulation avec plus de précision.
- Réaliser des mesures de pertes à haute fréquence sur des composants intégrés réels afin de cerner une étendue de mesure en fréquence.

Pour les perspectives à long terme :

- Placer le dispositif calorimétrique dans une salle dont la température est maintenue stable afin de limiter les variations du flux entrant dans le calorimètre.
- Améliorer la compatibilité électromagnétique de l'ensemble du calorimètre afin de limiter les interférences électromagnétiques et radiofréquences qui pourraient nuire aux dispositifs de mesure et de régulation du calorimètre.

Annexe : modes opératoires du calorimètre

1. Introduction

Dans ce paragraphe, nous donnons les différents modes opératoires pour l'ouverture du calorimètre, l'ouverture de la cellule de mesure, la mise en place de l'échantillon à tester dans la cellule de mesure, le démarrage du groupe de pompage et la mesure des pertes dans le composant donné, à l'attention d'un utilisateur lambda et d'un service technique de maintenance.

2. Casser le vide du calorimètre

Pour casser le vide dans le calorimètre, procéder comme suit

1-arrêter le groupe de pompage en coupant le courant avec l'interrupteur de mise sous tension **ON/OFF** de la pompe primaire (bouton situé à gauche du bouton « **START** »

2-Fermer la vanne **V2** séparant la pompe primaire de la turbo moléculaire

3-Ouvrir doucement la vanne **V1** constituant la prise d'air et attendre que la turbo moléculaire cesse de tourner

5-Ouvrir la bouteille d'azote gazeux, puis le robinet situé en aval

6-Ouvrir doucement la vanne **V4** et allumer le lecteur de la jauge pirani (bouton **ON/OFF** dans le cadran noir de la pompe)

7-Lorsque le lecteur de la jauge pirani n'indique plus de valeur, fermer la bouteille d'azote puis attendre 30 secondes pour que l'aiguille du manomètre revienne à **ZERO**

8-Fermer le robinet et en suite fermer la vanne **V4**

9- Déconnecter tout doucement l'amenée d'azote gazeux sur le calorimètre (en amont du T, coté groupe de pompage). Il est possible que le calorimètre ne soit pas à la pression atmosphérique, faire alors rentrer de l'air au fur et à mesure

3. Ouverture du calorimètre

Lorsque le calorimètre n'est pas sous vide, son ouverture est réalisée en suivant la procédure suivante :

10- Déconnecter les amenées de courant

11- Déconnecter le tuyau de pompage (en amont du T, coté groupe de pompage)

12- Dévisser les six vis de la bride calorimétrique

13- Sur la commande du système de levage, appuyer sur le bouton « **MONTE** » (flèche vers le haut) jusqu'à l'arrêt automatique du moteur

14-Pour la fermeture, suivre la même procédure dans le sens contraire

4. Ouverture de la cellule de mesure

Lorsque le système de levage de la bride est en position **HAUTE**, l'ouverture de la cellule de mesure est réalisée comme suite :

15- Mettre les gants latex

16- Dévisser les quatre vis correspondantes aux positions des tiges du **système d'ouverture** de la cellule (deux vis au sommet et à la base de la cellule)

- 17- Démonter les quatre tiges du système d'ouverture de la cellule
- 18- Positionner le système d'ouverture de la cellule sur la sphère
- 19- Placer les tiges du système d'ouverture, une par une à la place des vis, et visser ces tiges dans le système d'ouverture
- 20- Dévisser les quatre dernières vis (vis latérales de la sphère) et les remplacer par les vis en nylon
- 21- Visser les vis en nylon de façon à ce que la sphère s'ouvre
- 22- Lorsqu'il y a suffisamment d'espace entre les deux demi-sphères, placer les doigts et glisser la demi-sphère mobile sur les tiges jusqu'à extension total des fils des capteurs Pt100
- 23- Pour la fermeture de la sphère, suivre la même procédure dans le sens contraire.

5. Installation du composant

Pour être installé, le composant doit être muni d'un système d'accrochage. Le processus d'installation du composant (cellule ouverte) est effectué comme suit :

- 24- Sur la demi-sphère fixe, repérer les deux vis permettant de fixer le support du composant, ce dernier étant un fil de constantan de 0,1 mm de diamètre
- 25- Dévisser légèrement ces deux vis sans les démonter complètement
- 26- Prendre un fil de constantan de 200 mm de longueur et l'enrouler sur une des vis (deux à trois tours suffisent) puis resserrer cette dernière afin de fixer le fil
- 27- Faire passer l'autre extrémité du fil à travers le système d'accrochage du composant
- 28- Enrouler le fil sur la deuxième vis de fixation du composant après avoir vérifié que ce dernier est bien suspendu au centre de la cellule puis visser afin de fixer le fil
- 29- Défaire le composant de la cellule en procédant dans le sens inverse de la procédure d'installation de ce dernier

6. Démarrage du groupe de pompage

Après la fermeture du calorimètre et après vérification de la connectivité des amenées de courant, du tuyau de pompage et de l'amenée de l'azote gazeux, le démarrage du groupe de pompage est effectué comme suit :

- 30- Vérifier que la prise d'air est fermée
- 31- Ouvrir la vanne **V2** séparant la pompe primaire de la turbo moléculaire
- 32- Ouvrir la vanne **V3** séparant la turbo moléculaire de l'enceinte calorimétrique
- 33- Démarrer la pompe primaire à l'aide de l'interrupteur de mise sous tension **ON/OFF**
- 34- Allumer le lecteur de la jauge pirani (bouton **ON/OFF** dans le cadran noir de la pompe)
- 35- Démarrer la turbo moléculaire lorsque le lecteur de la jauge pirani indique une pression inférieure à 8.10^{-2} mbar à l'aide du bouton **START** (maintenir ce bouton pendant 5 secondes)
- 36- Arrêter le lecteur de la jauge pirani

37- Allumer le lecteur de la jauge penning pour observer la pression résiduelle dans le calorimètre (interrupteur situé à l'arrière du boîtier) et attendre la stabilisation de l'aiguille

7. Mesure des pertes de puissance sur un composant

La mesure des pertes de puissance sur un composant à tester est réalisée comme suite :

38- Démarrer le régulateur de température (interrupteur **ON/OFF** situé à l'arrière)

39- Attendre deux jours de refroidissement de la cellule (réservoir d'azote étant plein), le composant étant dans un premier temps hors tension

40- Vérifier que la température de la cellule est bien inférieure à la température de mesure à laquelle l'on souhaite opérer

41- Vérifier que la puissance maximale mesurable est bien supérieure à la valeur des pertes que l'on souhaite mesurer

42- Appuyer sur le bouton **SELECT** et sélectionner **OUT1**, **2A**, **2B 2C** et **2D** qui donnent respectivement la puissance fournie par la régulation et les températures mesurées par les sondes correspondant. Appuyer sur le bouton « **NUMERIC** » pour visualiser les grandeurs **OUT1**, **2A**, **2B 2C** et **2D**

43- Appuyer sur **OUT1** et sélectionner la sonde de régulation dans « **Input** »

44- Appuyer sur **OUT1**, fixer la consigne de température dans « **Set point** » et finir en appuyant sur « **OK** »

45- Appuyer sur **OUT1** et choisir la gamme de tension et de courant **50 V**, **0.5 A** dans « **Range** »

46- Appuyer deux fois sur le bouton « **Output Enable** » pour démarrer la régulation.

47- Revenir sur **NUMERIC** pour afficher les grandeurs sélectionnées et au besoin appuyer sur le bouton « **Plot** » pour afficher l'évolution des températures et de la puissance fournie par la régulation

48- Démarrer le **PC** d'acquisition des données

49- Sur le bureau, cliquer sur le raccourci « **PTC10 16** »

50- Dans la fenêtre « **Paramètres** », entrer la période d'échantillonnage (une seconde) et donner le nom de la mesure dans le cadran « **Nom fichier** »

51- Cliquer sur la **flèche blanche** en haut de l'écran pour valider

52- Dans la fenêtre « **Initialisation PTC10** », initialiser le programme en cliquant sur le bouton « Initialisation » (**flèche verte**)

53- Dans la fenêtre « **lancement régulation** », lancer l'acquisition en cliquant sur la flèche « **Affichage** » (**flèche verte**)

54- Sur le régulateur, lorsque la température au point de régulation est égale à la consigne de température, cliquer sur le bouton « **Calcul Puissance Moyenne** » sur le **PC** puis attendre **5 minutes** pour que la moyenne se stabilise

55- Relever la valeur de la puissance moyenne dans le cadran « **puissance moyenne** » cette valeur moyenne est égale à la puissance **P₀** définie dans le principe de mesure

56- Dans un second temps, **alimenter le composant électrique** en sélectionnant la tension d'alimentation sur le **GBF**. Lorsque la température au point de régulation est à nouveau égale à la température de consigne, effectuer l'opération **54** et noter cette puissance comme étant égale à **P₁**

57- La tension aux bornes du composant pourrait être mesurée à l'aide d'un multimètre

58- Calculer la puissance thermique dissipée par le composant comme la différence **P₀ moins P₁**

59- A la fin des mesures arrêter l'alimentation du composant, la régulation et le groupe de pompage

Table des figures

Figure 1 : Principe de la calorimétrie. On mesure l'échange de chaleur Q entre deux corps A et B isolés du monde extérieur T_h par S	10
Figure 2 : Principe du calorimètre adiabatique. La température T_{Th} de T_h est asservie (maintenue égale) à la température T_S de S afin d'annuler l'échange de chaleur Q_{ST} . La source de chaleur R permet de régler la température initiale du système S. On mesure la variation de température de S au cours du temps. La capacité calorifique de B étant connue, on en déduit la chaleur échangée par A	11
Figure 3 : Principe du calorimètre isopéribolique. La capacité calorifique de B est connue. Le système est quasiment adiabatique car T_e varie peu durant la mesure. On mesure la variation de température T_B . On en déduit la chaleur échangée par A	12
Figure 4 : Principe du calorimètre isotherme. On maintient constante la température de B. On mesure la variation de la chaleur apportée à B par le régulateur. On en déduit la chaleur échangée par A	13
Figure 5 : Principe du calorimètre à flux de chaleur. Chaque paire de thermocouple produit une ddp proportionnelle aux différences de température entre B et l'enceinte externe. On en déduit la chaleur échangée par A qui est proportionnelle à la somme de ces ddp	14
Figure 6 : Calorimètre adiabatique d'Ewen Ritchie et al. appliqué aux machines électriques. La température T_{Th} de T_h est asservie (maintenue égale) à la température T_S de S à l'aide de lampes afin d'annuler l'échange de chaleur. La résistance R permet de régler la température initiale du système S. On mesure l'élévation de la température du fluide passant par l'échangeur thermique. La capacité calorifique du fluide B étant connue, on en déduit la chaleur échangée par A	17
Figure 7 : Calorimètre quasi-adiabatique de Cyril Buttay et al. appliqué aux convertisseurs statiques. La capacité calorifique de l'huile B est connue. Le système est quasiment adiabatique car la température du bain d'eau T_e varie peu durant la mesure. On mesure la variation de température T_B . On en déduit la chaleur échangée par A	19
Figure 8 : Calorimètre isotherme de Seguin et al. appliqué aux condensateurs de puissance. On impose une fuite de chaleur constante de B vers le réservoir d'azote C_0 en maintenant $T_B - T_1$ constant à l'aide des régulateurs Reg1 et Reg2. La chaleur échangée par le condensateur A est égale à la variation de puissance fournie par le régulateur Reg2 pour maintenir T_B constante	21
Figure 9 : Calorimètre à flux de chaleur de Chen et al. appliqué aux composants de puissance. La thermopile enregistre une ddp proportionnel aux différences de températures entre B et le bloc calorimétrique. On en déduit la chaleur échangée par A qui est proportionnelle à cette ddp	23
Figure 10 : Principe de la mesure différentielle. L'objet A émettant de la chaleur est placé dans un système isotherme B. Dans un premier temps le composant est inactif. On mesure alors la puissance P_0 fournie au système isotherme pour le maintenir à une température T_0 , Dans un second temps le composant est actif. On mesure alors la puissance P_1 fournie au système isotherme pour le maintenir à la température initiale T_0 . Ainsi, l'écart entre la puissance P_0 et P_1 est directement égal à la puissance générée par l'objet P_{GEN}	32
Figure 11 : Modèle fonctionnel. L'ensemble corps isotherme-composant, constitue la source de chaleur du dispositif. L'échange thermique entre le composant et le corps isotherme s'effectue ici par rayonnement. Le thermostat sert de point froid au	

système calorimétrique et constitue ainsi le puits de chaleur. La source de chaleur et le thermostat sont situés à l'intérieur d'un système d'isolation thermique	33
Figure 12 : Coupe longitudinale du dispositif calorimètre dans son ensemble (3D) .	34
Figure 13 : Panneau de Styrodur® perforé.....	35
Figure 14 : Vue interne à l'enceinte à vide.....	36
Figure 15 : Vue détaillée de la cellule de mesure et des éléments de raccord au puits de chaleur.....	37
Figure 16 : Constitution de l'élément chauffant qui est inséré dans la cellule de mesure.....	41
Figure 17 : Séquences de mise en place du fil chauffant dans la cellule de mesure	42
Figure 18 : Six sondes cylindriques Pt100 (M1, M2, M3, F1, F2 et F3) sont insérées dans des trous creusés dans l'épaisseur de la sphère et collés à l'aide d'une colle de type Eccobond®	43
Figure 19 : Cinq thermocouples de type K sont répartis sur les écrans et l'enceinte à vide	45
Figure 20 : Photographie des faces avant et arrière du régulateur de température de la cellule de mesure.....	46
Figure 21 : Schéma fonctionnel de la régulation de température	47
Figure 22 : Photographie du système de levage du couvercle calorimétrique.....	49
Figure 23 : Vue détaillée du support d'assemblage des deux demi-sphères de la cellule de mesure	50
Figure 24 : Schéma du circuit de pompage permettant d'assurer un vide secondaire dans l'enceinte du calorimètre	51
Figure 25 : Isotherme et gradient thermique, T et T' sont des surface isothermes, n est le vecteur unitaire de la normale à la surface isotherme T au point M et Λ est un vecteur unitaire désignant une direction donnée passant par M et faisant un angle θ avec la normal n	57
Figure 26 : Bilan de puissance pour un système unidimensionnel : mur d'épaisseur e , de hauteur L et de profondeur infinie.....	59
Figure 27 : Représentation d'un tube de flux en régime stationnaire. $A(s_1)$ et $A(s_2)$ sont des sections isothermes à températures respectives T_1 et T_2 , et séparées par une résistance thermique de conduction R_{TH} dont l'expression théorique est donnée par (49).....	61
Figure 28 : Echange radiatif entre deux éléments de surface isothermes dS_1 et dS_2 de normales respectives n_1 et n_2 . $d\Omega_1$ est l'angle solide élémentaire de l'éléments dS_2 vu de dS_1 . r est la distance séparant les deux éléments. $L_{1\lambda}$ et $L_{2\lambda}$ sont les luminances spectrales	63
Figure 29 : Luminance spectrique du corps noir à différentes températures en fonction de la longueur d'onde.....	66
Figure 30 : Nomenclature des éléments pris en compte par la modélisation. Le calorimètre est découpé en deux grands ensembles I et S . Ces ensembles sont reliés par les résistances R_{THV} et R_{THEE}	69
Figure 31 : Représentation schématique des échanges de chaleur entre les différents éléments isothermes du calorimètre : T_i est la température de l'élément i , \mathfrak{F}_{ij} , \mathfrak{R}_{ij} et R_{ij} sont respectivement le facteur de forme gris, la résistance au rayonnement et la résistance de conduction entre les éléments i et j , r_i est la résistance de surface au rayonnement de S_i . Ces éléments seront définis clairement dans la partie : équations du modèle. Q_1 et Q_3 sont respectivement la puissance fournie par le composant lorsqu'il est actif et la puissance fournie par la régulation.....	72

Figure 32 : Comparaison de l'équation (69) à la loi de Wiedmann-Franz dans le cas du Cuivre	74
Figure 33 : Comparaison de l'équation (72) aux données de Sundqvist dans le cas du Constantan	75
Figure 34 : Comparaison de l'équation (75) avec les données de Glenn Elert dans le cas de l'Or	76
Figure 35 : Comparaison entre les données d'émissivité mesurées par Roger et al. avec la courbe obtenue par la théorie de Davisson et Weeks.....	78
Figure 36 : Représentation des surfaces en regards intervenant dans le calcul des facteurs de forme relatif au réservoir d'azote.....	80
Figure 37 : Représentation des surfaces en regards intervenant dans le calcul des facteurs de forme, relatif à la cellule de mesure ($a= 0,28$ m et $r = 0,125$ m).....	81
Figure 38 : Schéma électrique équivalent représentant les échanges radiatifs entre les surfaces grises S_3 , S_{EI} et S_H	83
Figure 39 : Schéma électrique équivalent représentant les échanges radiatifs entre les surfaces grises S_{ES} , S_C , S_0 et S_H	85
Figure 40 : Nomenclature des éléments pris en compte par la modélisation. La plaque de fond de Styrodur est découpée en trois éléments ayant respectivement des résistances thermiques R_{TH4} , R_{TH5} et R_{TH6}	88
Figure 41 : Section du tube de flux permettant de calculer la résistance thermique R_{TH4}	89
Figure 42 : Section du tube de flux permettant de calculer la résistance R_{TH5}	89
Figure 43 : Evolution du flux entrant dans le calorimètre et la cellule de mesure en fonction de la température ambiante sans génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$).....	100
Figure 44 : Evolution de la température de la surface externe de la cellule en fonction de la température ambiante pour différentes puissances fournies par la régulation (i.e. Q_3) sans génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$)	101
Figure 45 : Cartographie des températures des principaux éléments du calorimètre en fonction de la puissance de régulation de la cellule (Q_3). Il n'y pas de génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$)	102
Figure 46 : Evolution de la température de la surface externe de la cellule en fonction de la puissance de régulation Q_3 avec et sans écran horizontal H. Il n'y a pas de génération de puissance dans le composant (i.e. $Q_1 = 0$)	103
Figure 47 : Influence de l'émissivité de l'écran horizontal H sur les températures des éléments S_3 , S_H , S_E et S_V en l'absence de génération de puissance (i.e. $Q_1 = Q_3 = 0$) pour une température ambiante fixée à 300K.....	103
Figure 48 : Evolution du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier avec la cellule en fonction de la température de celle-ci lorsque l'on considère des amenées de courants en cuivre et en constantan. Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle.....	104
Figure 49 : Evolution du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier avec la cellule en fonction de la température de celle-ci lorsque l'on fait varier l'émissivité de la surface interne de la cellule. Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée, la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle.....	105
Figure 50 : Evolution du ratio du flux rayonné par le composant sur le flux total échangé par ce dernier avec la cellule en fonction de la température de celle-ci lorsque l'on fait varier l'émissivité du composant. Le flux total émis par le composant	

est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée, la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle	107
Figure 51 : Influence de l'émissivité du composant sur sa température pour différentes puissances générées par ce composant sans régulation de la cellule ($Q_3 = 0$). La température ambiante est fixée à 300K.....	107
Figure 52 : Evolution des températures du composant et de la cellule en fonction de la puissance Q_{1max} permettant d'imposée une température T_3 . Pour maintenir la cellule à une température imposée T_3 , il faut fournir une puissance Q_3 sans génération de puissance dans le composant ou inversement on peut maintenir T_3 en apportant une puissance $Q_1 = Q_{1max}$ sans régulation. L'émissivité de la peinture est fixée à 0,97.....	108
Figure 53 : Evolutions de la puissance fournie à la cellule par la régulation pour la maintenir à une température fixée T_3 et de la puissance dissipée par la cellule. La puissance dissipée correspond à la puissance échangée avec les éléments S_3 , S_H S_E et S_V . Le flux total émis par le composant est nul ($Q_1 = 0$)	109
Figure 54 : Evolution des fuites thermiques dans les différents supports et amenées de courant en fonction de la température de la cellule (T_3). Le flux total émis par le composant est fixé à $Q_1 = 100$ mW. Pour chaque température fixée la régulation fournit une puissance Q_3 déterminée par le modèle	110
Figure 55 : Représentation des éléments pour la modélisation des échanges de chaleur à travers une amenée de courant reliant le composant à la cellule de mesure. $I(A)$ représente le courant électrique d'alimentation du composant.....	111
Figure 56 : Profil spatial de température dans l'amenée de courant en cuivre ou en constantan.....	112
Figure 57 : Flux transmis par conduction ($-k.A.dT/dx$, $A = \pi D^2/4$) en différents points de l'amenée de courant considérée en cuivre ou en constantan.....	113
Figure 58 : Evolution de la différence de température de la cellule ΔT entre les états actif et inactif du composant en fonction de la température initiale de la cellule. La température de la cellule est régulée pour chaque état du composant	114
Figure 59 : Evolution temporelle de température des principaux éléments du calorimètre en l'absence de génération de puissance ($Q_1 = Q_3 = 0$). Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre	117
Figure 60 : Evolution temporelle de température de la cellule en l'absence de génération de puissance ($Q_1 = Q_3 = 0$) pour différents matériaux constituant son support d'accrochage au réservoir d'azote.....	118
Figure 61 : Evolutions de la température de la cellule, à la suite du remplissage du réservoir d'azote. La régulation est inactive et le composant est absent de la cellule. La température est mesurée par la sonde F1. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite fait d'époxy et de fibre de verre. La cellule est placée sous un vide secondaire. Cette évolution est mise en comparaison avec la réponse théorique de la température de la cellule qui ne tient pas compte des résistances thermiques de contact ($RTC = 0$).....	125
Figure 62 : Evolutions de la température de la cellule, à la suite du remplissage du réservoir d'azote. La régulation et le composant sont inactifs. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. Le support d'accrochage de la cellule est en cuivre. La cellule est placée sous un vide secondaire. Cette évolution est mise en comparaison avec les réponses théoriques de la température de la cellule pour différentes valeurs de la résistance thermique de contact globale entre la cellule et le réservoir d'azote	126

Figure 63 : Evolutions de la température de cellule, à la suite du remplissage du réservoir d'azote. La régulation est inactive et le composant est absent de la cellule. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. La cellule est placée sous un vide secondaire. Les différents supports d'accrochage de la cellule ont été testés	127
Figure 64 : Evolutions de la température (a) et de la puissance de régulation (b) de la cellule, en réponse à un échelon de température de 10 °C. La régulation est active mais le composant est absent de la cellule. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable	129
Figure 65 : Temps de réponse thermique de la cellule (à 5% de la valeur finale) en fonction des différentes températures de consignes. La température de la cellule à été enregistrée en réponse à des échelons de température de consigne de 10 °C. La régulation est active mais le composant est absent de la cellule. La température mesurée est issue de la sonde Pt100 référencée F1. Le support d'accrochage de la cellule est en époxy fibre de verre	130
Figure 66 : a) Evolution de la puissance fournie par le régulateur pour maintenir la cellule à -30 °C lorsque l'on alimente un composant ; b) Evolution de la température de la cellule. Dans ces deux enregistrements un composant se met à dissiper une puissance de 103,3 mW à partir de la 16 ^{ième} heure de régulation	131
Figure 67 : Géométrie du domaine modélisé par éléments finis représentant la cellule de mesure : (1) vide (conductivité thermique équivalente $k_1=4\varepsilon\sigma hT^3$, avec $h = 0,1$ m est la profondeur du cylindre, $T = 450$ K, $\varepsilon = 0,03$ émissivité de l'or poli et $\sigma=5,67.10^{-8}$ est la constante de Stefan-Boltzmann) ; (2) frontière du milieu ambiant avec condition aux limites de température imposée ; (3) faces avec condition aux limites de flux nul (adiabatique) ; (4) cellule de conductivité thermique $k_4=392$ W m ⁻¹ K ⁻¹ ; (5) fil chauffant de 1 mm de diamètre (conductivité thermique $k_5 = 15$ W m ⁻¹ K ⁻¹) ; (6) laque conductrice à l'argent (conductivité thermique $k_6=4$ W m ⁻¹ K ⁻¹)	133
Figure 68 : Cartographie théorique des températures déduites du modèle par éléments finis réalisé sur Flux2D® en présence d'une génération de puissance dans les fils chauffants de la cellule de mesure	133
Figure 69 : Profil théorique de température obtenu le long du chemin AC ; l'abscisse r parcourt le segment [AC] de la surface externe S ₃ (point A) vers la surface interne S ₂ (point C) de la cellule de mesure	134
Figure 70 : Profils théorique des écarts de température $\Delta T=T(r)-T_A$ obtenus le long du chemin AC pour différentes températures au point A	134
Figure 71 : Evolution théorique de l'écart de température T _C -T _A en fonction de la température au point A (T _A) correspondant à différentes puissances générées dans le fil chauffant	135
Figure 72 : Profils théoriques des écarts de température $\Delta T=T(r)-T_A$ obtenus le long du chemin AC lorsqu'on fait varier la température ambiante pour une même puissance générée dans les fils chauffants	136
Figure 73 : Profils théoriques de température obtenus en parcourant des arcs de cercle pris respectivement sur la surface externe S ₃ et interne S ₂ de la cellule de mesure.....	136
Figure 74 : Caméra infrarouge FLIR ThermaCAM 360T	137
Figure 75 : a) Champs de température de la surface interne de la cellule obtenu par la caméra IR ThermaCAM T360 (La température mesurée par une sonde Pt100 est de 63°C) ; b) Photographie de la cellule de mesure avant revêtement de la peinture noire.....	138

Figure 76 : Disposition des sondes Pt100 (F1, F2, F3, M1, M2 et M3) sur la cellule de mesure.....	139
Figure 77 : Ecart de température entre les sondes F1 et F3 (demi-sphère fixe) en fonction de la température de la cellule mesurée par la sonde F1 pour différents matériaux constituant son support d'accrochage au réservoir d'azote	140
Figure 78 : Ecart de température entre les sondes M1 et M3 (demi-sphère mobile) en fonction de la température de la cellule mesurée par la sonde F1 pour différents matériaux constituant son support d'accrochage au réservoir d'azote	140
Figure 79 : Observation des températures mesurées à partir des sondes Pt100 immédiatement après le remplissage du réservoir d'azote. Le support d'accrochage de la cellule est ici en cuivre Cu-b1	141
Figure 80 : Observation des températures mesurées à partir des sondes Pt100 immédiatement après le remplissage du réservoir d'azote. Le support d'accrochage de la cellule est ici en matériau composite (époxy fibre de verre)	141
Figure 81 : Comparaison de la puissance fournie par la régulation pour maintenir la cellule à une température imposée entre la théorie et l'expérience. Le composant est inactif. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite (époxy fibre de verre)	144
Figure 82 : Comparaison de la puissance fournie par la régulation pour maintenir la cellule à une température imposée entre la théorie et l'expérience. Le composant est inactif. Le support d'accrochage de la cellule est en matériau composite (époxy fibre de verre) en prenant en compte l'équation (155).....	146
Figure 83 Variation de la puissance fournie par la régulation au cours du temps pour maintenir la température de la cellule à la consigne imposée de 0 °C. a), le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304L, b) ce support d'accrochage est en cuivre Cu-b1 b)	147
Figure 84 : Puissance fournie par la régulation pour maintenir la cellule à une température imposée pour différents matériaux constituant le support d'accrochage. Le composant est inactif. Les courbes continue et en pointillé représentent le modèle théorique respectivement pour un support d'accrochage en matériau composite et en cuivre	148
Figure 85 : Schéma du composant résistif. Il est constitué d'un tube en cuivre de diamètre 20 mm, de longueur 30 mm et d'épaisseur 1 mm, sur lequel est bobiné un fil de constantan. L'ensemble est ensuite recouvert de peinture noire. La résistance électrique totale du composant est de 1047,2 Ω	149
Figure 86 : Schéma de connexion des différents éléments de mesure du dispositif expérimental.....	150
Figure 87 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour de « faibles » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L ...	154
Figure 88 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{mes}$ pour de « fortes » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L ...	155
Figure 89 : Evolution des puissances thermiques mesurées en fonction de la température de la cellule pour différentes puissances injectées. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L.....	156
Figure 90 : Evolution de la puissance fournie par la régulation lorsque l'on passe d'une température de consigne de +80°C à +90 °C. Le composant est inactif et Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L.....	157

Figure 91 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour de « faibles » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en cuivre Cu-b1	158
Figure 92 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour de « fortes » puissances injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en cuivre Cu-b1	158
Figure 93 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ pour des puissances de l'ordre de 100 mW, 500 mW et 1000 mW injectées par le composant résistif à différentes températures de la cellule mesurée au point de régulation. Le support d'accrochage de la cellule est en époxy fibre de verre	159
Figure 94 : Ecart relatif $(P_{inj} - P_{mes}) / P_{inj}$ à différentes températures de la cellule mesurées au point de régulation pour différents matériaux constituant le support d'accrochage en époxy fibre de verre, en acier inoxydable et en cuivre. La puissance injectée par le composant résistif est de l'ordre de 100 mW.....	161
Figure 95 : Influence de l'émissivité de la surface externe du composant pour différentes températures imposées à la cellule. La puissance injectée dans le composant est égale à 103,3 mW. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L	163
Figure 96 : Influence de l'émissivité de la surface externe du composant pour différentes températures imposées à la cellule. La puissance injectée dans le composant est égale à 503,4 mW. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L	163
Figure 97 : Influence de l'émissivité de la surface externe du composant pour différentes températures imposées à la cellule. La puissance injectée dans le composant est égale à 1005,5 mW. Le support d'accrochage de la cellule est en acier inoxydable 304 L.....	164

Elysée OBAME N'DONG « Développement d'un dispositif de calorimétrie par rayonnement thermique : appliqué à la mesure des pertes dans les composants électriques », Thèse en Génie Electrique, Université de Grenoble, 10 décembre 2010, pp.1-181

Résumé : Nous avons imaginé et conçu un nouveau dispositif calorimétrique, destiné à caractériser les pertes de puissance dans les composants électriques. Dans ce nouveau calorimètre, l'échange de chaleur entre le composant et la cellule de mesure s'effectue par rayonnement thermique. Ce dispositif permet de s'affranchir de la forme géométrique du composant. Le calorimètre fonctionne dans une gamme de température allant de 200 à 400K. Il permet ainsi de remonter aux pertes en fonction d'un environnement isotherme contrôlé. Le composant électrique peut être alimenté par une tension arbitraire inférieure à 3kV. Ce mémoire contient une description technique du dispositif. On y développe un modèle analytique représentatif des échanges de chaleur dans le calorimètre. L'analyse des résultats obtenus sur des composants dont les pertes sont connues y est enfin donnée. Celle-ci a montré que la précision de mesure était inférieure à 5% pour une gamme de puissance dissipée allant du mW au Watt.

Mots clés : calorimètre, rayonnement thermique, pertes de puissance, composant électrique, émissivité thermique, facteur de forme, modèle analytique d'échange de chaleur.

Abstract: We have designed and developed a new calorimeter intended to characterize the power losses in electrical components. In the new calorimeter, the heat exchange between the component and the measuring cell is by thermal radiation. This device overcomes the geometric shape of the component. The calorimeter operates in a temperature range from 200 to 400K. It allows to retrieve the losses according to a controlled environment insulated. Electrical components can be powered by voltages below 3kV arbitrary. This memory contains a technical description of the device. It develops an analytical model representing the heat transfer in the calorimeter. The analysis results obtained on components whose losses are known is finally given. This showed that the accuracy of measurement was less than 5% for a range of dissipated power from mW to Watt.

Keywords: calorimeter, heat radiation, power loss, electrical component, thermal emissivity, view factor, analytical model of heat transfer.

Co-directeurs de thèses : Frédéric AITKEN et Olivier GALLOT-LAVALLEE

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, UMR 5296 (UJF-GINP-CNRS), 25 Rue des Martyrs, 38042 Grenoble