



t e m i s t h


Evaluation des performances d'un dissipateur thermique par convection naturelle

Résultats de mesures expérimentales en air

Benoît PAILLETTE – Stagiaire ingénieur TEMISTh
Jean-Michel Hugo – Dirigeant TEMISTh

Hôtel Technologique de Château-Gombert
45 rue Frédéric Joliot-Curie
13382 Marseille Cedex 13


31/07/2013

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 2
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

REFERENCE	Alveotec – 20130801-A				
CASE	Devis n°201305004 du 27/05/2013 :				
TITLE	Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle				
EDITION	Index	The modified object	Date	Pages	Registration
	A	Provisoire	6/08/13	19	
RESUME					

Ce document présente les résultats de mesures des performances thermiques d'un dissipateur de chaleur à mousse ALVEOTEC en convection naturelle dans l'air.


Key words						
QUALITY	NAME	VISA		QUALITY	NAME	VISA
Author	Benoît Paillette			Approved	J.-M. Hugo	
Author	J.-M. Hugo					
Diffusion	<p>M : Matthieu BLANCHET, responsable de Projet Alveotec</p>					


	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 3
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

Contenu

1	Présentation	5
1.1	Contexte.....	5
1.2	Objectifs.....	6
2	Présentation du dispositif expérimental	7
2.1	Dispositif d'ensemble	7
2.2	Détail de la veine d'essais	8
3	Protocole expérimental.....	11
4	Résultats et analyses.....	12
4.1	Description des mesures	12
4.2	Inclinaison de l'objet	13
4.3	Influence du flux de chaleur – niveau de température.....	14
5	Conclusion.....	19

Figure 1.	Illustration du comportement d'ailette lisse en fonction de l'orientation du flux de chaleur. A gauche, l'ailette est dans le sens de l'écoulement, sa surface est pleinement utilisée. A droite, l'ailette est inclinée, son efficacité est réduite.	5
Figure 2.	Illustration par CFD d'un écoulement par convection naturelle autour d'ailettes.....	6
Figure 3.	Schéma d'ensemble du dispositif expérimental.....	7
Figure 4.	A gauche : Vue de la veine d'essais inclinée. A droite : modélisation de la veine d'essais par CAO.....	8
Figure 5.	Schéma de principe de la veine d'essai.....	9
Figure 6.	Vue de la veine d'essais instrumentée.	10
Figure 7.	Evolutions des différentes températures mesurées au cours du temps : Etablissement du régime stationnaire pour l'échantillon positionné à l'horizontale.....	12
Figure 8.	Evolutions des différentes températures mesurées au cours du temps : Etablissement du régime stationnaire pour l'échantillon positionné à la verticale.....	13
Figure 9.	Coefficient d'échange en fonction de l'angle d'inclinaison de l'échantillon	14
Figure 10.	Température de contact en fonction de la puissance thermique dissipée au travers de l'échantillon.	15
Figure 11.	Coefficient d'échange HS en fonction du flux de chaleur dissipé au travers de l'échantillon.....	16
Figure 12.	Coefficient d'échange HS en fonction de l'écart de température à la puissance 1/3.	16
Figure 13.	Efficacité du dispositif en fonction de la puissance électrique imposée.....	17
Figure 14.	Exemple d'évolution de température. A gauche pour un coefficient d'échange médiocre. A droite pour un coefficient d'échange amélioré.	18

	<small>REFERENCE</small> Alveotec-201308001-A	<small>Indice</small> A	<small>Auteur(s) – Contact(s)</small> Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 4
	<small>TITRE</small> Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		<small>AFFAIRE</small> Devis n°201305004 du 27/05/2013	

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 5
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

1 Présentation

1.1 Contexte

Cette étude est réalisée dans le cadre d'une caractérisation expérimentale des performances thermiques d'un dissipateur thermique en convection naturelle utilisant un matériau cellulaire ouvert comme extension de surface.

Des essais expérimentaux concluants ont déjà été réalisés par des industriels désirant refroidir des lampes à LED. Des tests numériques ont également été menés et se corrélaient plutôt bien avec l'expérience.

Les principaux avantages des mousses métalliques dans ce type d'applications sont :

- Des pertes de charges relativement peu élevées
- Une bonne conductivité de la matrice solide
- Une surface d'échange développée importante
- Une isotropie de la géométrie par rapport aux transferts de chaleur

Le dernier point est un avantage non négligeable pour l'utilisation de mousse. En effet, contrairement à une extension de surface par ajout d'ailettes, les matériaux cellulaires ouverts ne bloqueront pas l'écoulement, et ce, a priori, quel que soit l'orientation du composant à refroidir. La Figure 1 et Figure 2 illustrent la problématique liée à l'utilisation d'ailettes pour le refroidissement par convection naturelle.

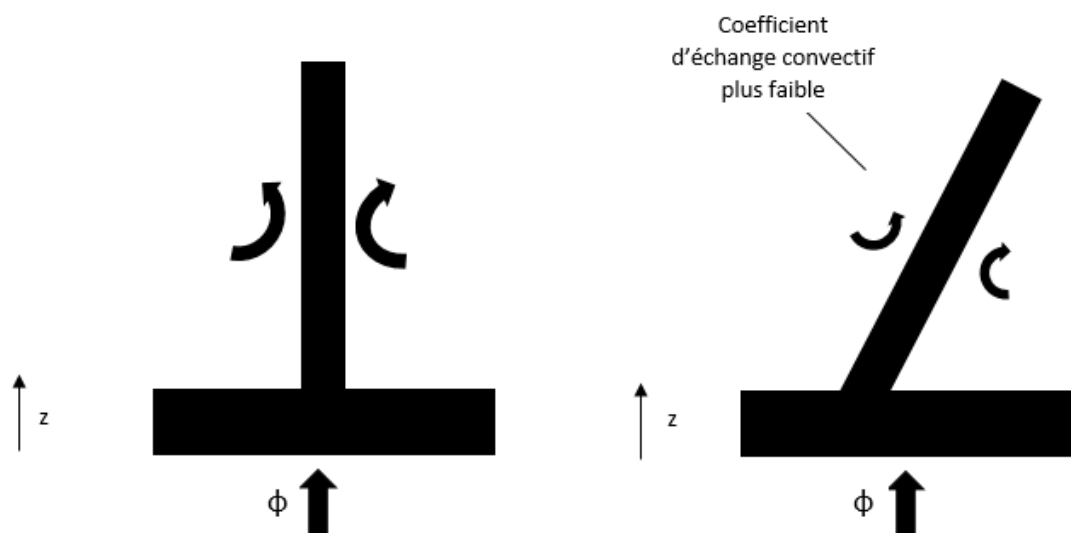



Figure 1. Illustration du comportement d'ailette lisse en fonction de l'orientation du flux de chaleur. A gauche, l'ailette est dans le sens de l'écoulement, sa surface est pleinement utilisée. A droite, l'ailette est inclinée, son efficacité est réduite.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 6
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

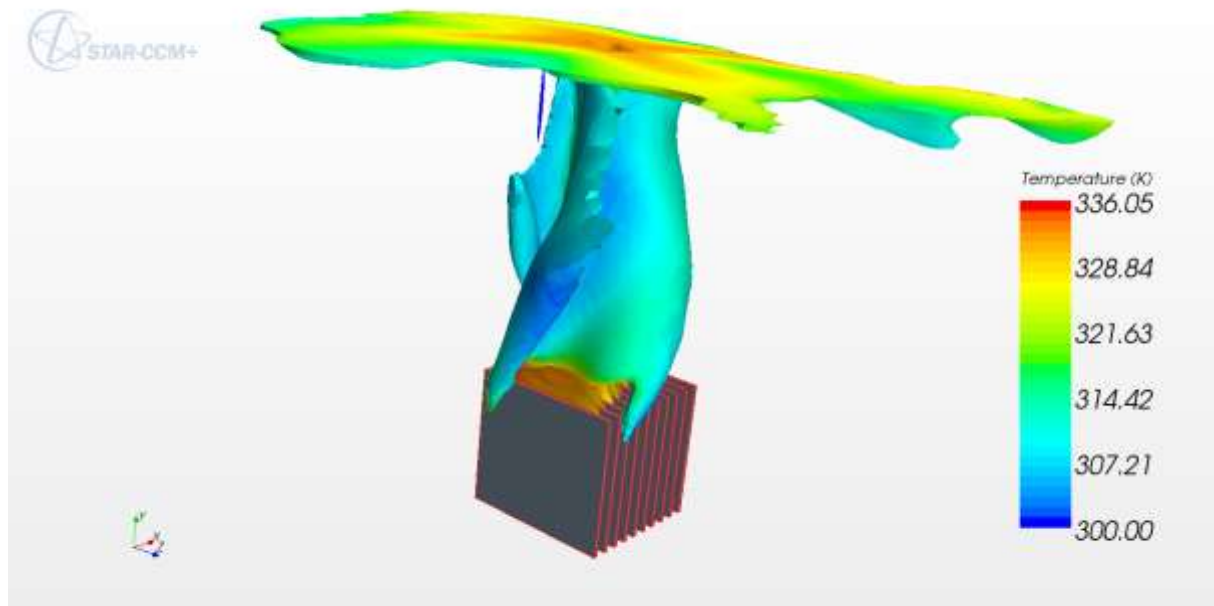


Figure 2. Illustration par CFD d'un écoulement par convection naturelle autour d'ailettes.


1.2 Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de réaliser un banc de mesures expérimentales qui permettra de caractériser les performances du dissipateur de chaleur à mousse Alveotec en convection naturelle dans l'air ambiant.

Les mesures expérimentales seront effectuées dans un cadre de dissipation des calories par conduction dans la matrice solide, puis par convection naturelle avec l'air ambiant. Les mesures seront différentes de celles qui ont pu être effectuées antérieurement sur des refroidisseurs de LED où le rayonnement thermique n'est pas négligeable.

Les mesures qui sont effectuées ont deux sous-objectifs :

- La caractérisation du dissipateur en fonction de la puissance imposée.
- La caractérisation du dissipateur en fonction de l'angle qu'il forme avec l'horizontale.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 7
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

2 Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental que nous avons réalisé a été conçu afin de répondre aux objectifs précédents.

2.1 Dispositif d'ensemble

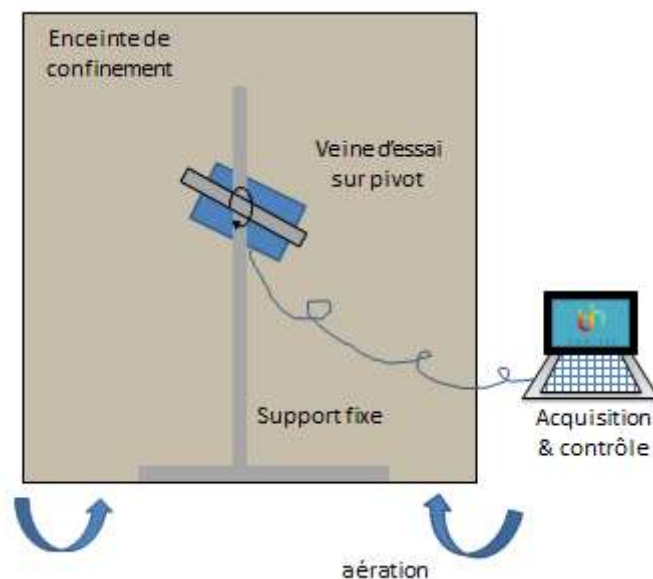


Figure 3. Schéma d'ensemble du dispositif expérimental.


La Figure 3 montre un schéma d'ensemble de fonctionnement du dispositif expérimental. Une enceinte permet de maintenir la veine d'essais hors des perturbations extérieures, notamment les courants d'air et les variations de température. Cependant, l'enceinte sera ouverte sur sa partie inférieure afin de permettre une aération de celle-ci et limiter sa montée en température lors des différents tests. Un système de contrôle des paramètres et d'acquisition de données permet de maîtriser les tests expérimentaux. Les données d'entrées sont :

- La puissance électrique de chauffage (flux de chaleur potentiel à évacuer)
- L'angle que forme la veine d'essais avec l'horizontale

Les données enregistrées par l'acquisition sont :

- La puissance thermique dissipée par l'échantillon
- Les différentes températures de l'enceinte, sur le support (contrôle de fuites thermiques éventuelles) et de l'échantillon.

Un support fixe couplé à un deuxième support rotatif permet de supporter la veine d'essais et de l'orienter, tout en ne perturbant pas l'écoulement d'air autour du dissipateur (Figure 4).

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 8
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

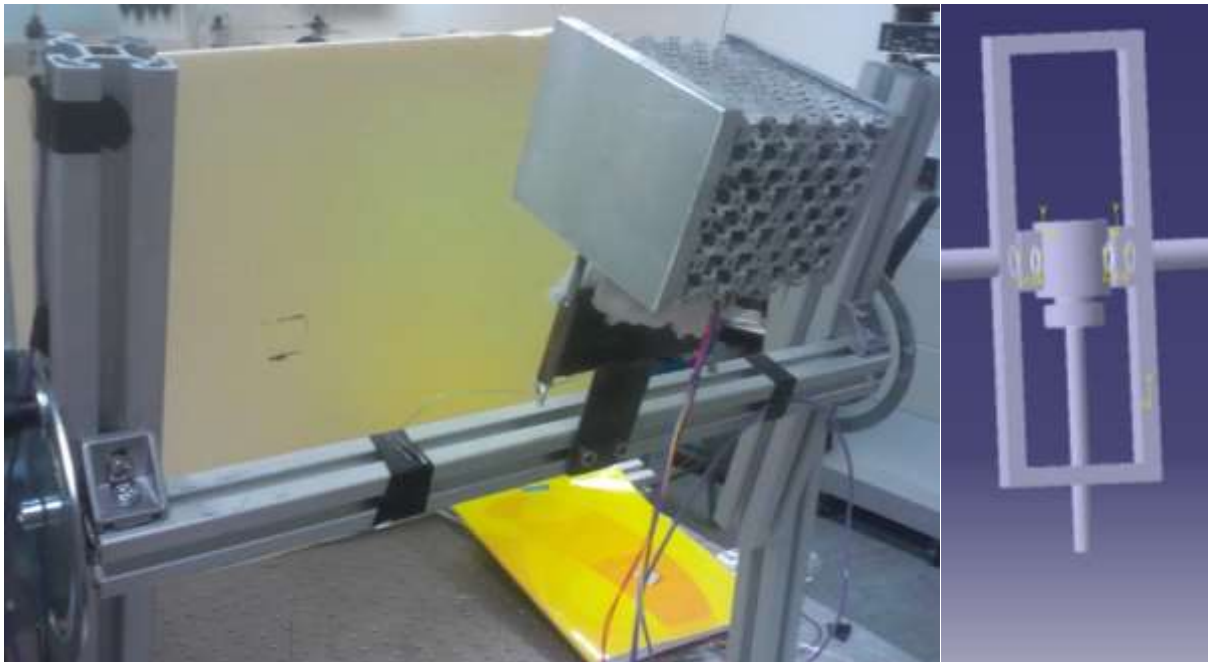



Figure 4. A gauche : Vue de la veine d'essais inclinée. A droite : modélisation de la veine d'essais par CAO.

2.2 Détail de la veine d'essais

La veine d'essais que nous pouvons voir sur la Figure 4 est détaillée sur le schéma en vue éclatée Figure 5.

Une résistance thermique de 50 Ohms dissipe de la chaleur par effet Joule. La résistance étant plane, le flux de chaleur est forcément orienté selon la normale au plan de la résistance. Une partie du flux est orienté vers l'échantillon de mousse (nous l'appellerons le flux dissipé ou mesuré), et une autre partie est orientée vers le bas de la veine d'essais (nous les appellerons seront les pertes thermiques). Afin de mesurer le flux de chaleur dissipé dans la mousse, nous insérons un capteur de flux thermique entre la résistance et l'échantillon. Ce capteur permet à la fois, de mesurer le flux de chaleur le traversant et sa température (Figure 6-Th4). Il est « fixé » à l'échantillon à l'aide d'une pâte silicone chargée ayant une conductivité thermique relativement élevée (~30-40W/mK). Cette pâte, dite thermique, permet de rendre quasiment nulle la résistance thermique entre le fluxmètre et l'échantillon de mousse. En effet, en pressant l'ensemble, la pâte thermique remplit toutes les aspérités des deux faces et forme une couche très mince. La température du fluxmètre est alors très proche de la température de la face de l'échantillon.

Les pertes thermiques sont limitées par l'ajout d'un support isolant en époxy. Le choix de ce matériau vient de sa nature isolante, mais aussi de la résistance à la chaleur. En effet nous pouvons le monter à une température aux alentours de 100°C sans qu'il se détériore. Une couche d'isolant fibreuse est rajoutée entre l'isolant époxy et le support. Notons que les couches d'isolant sont d'un diamètre à peine supérieure à celui du système de chauffage et

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 9
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

inférieur à la celui de la face solide de l'échantillon. L'écoulement d'air n'est donc pas modifié par la présence des isolants.

Un support de fixation à lamelle métallique permet de serrer le système chauffage-mesure-échantillon-isolant ensemble et de le fixer au support rotatif. La forme en lamelle métallique du support permet de ne pas modifier l'écoulement d'air. Afin de s'assurer que ce support ne chauffe pas à cause des pertes, nous mesurons sa température (Figure 6 – Th2). Pour des températures inférieures à 40°C, la convection naturelle engendrée par le support sera négligeable.

A l'aide de thermocouples type K, nous mesurons la température de l'enceinte en différent point, ainsi que la température de surface de la mousse en son sommet (Figure 6 – Th3 et Th1).

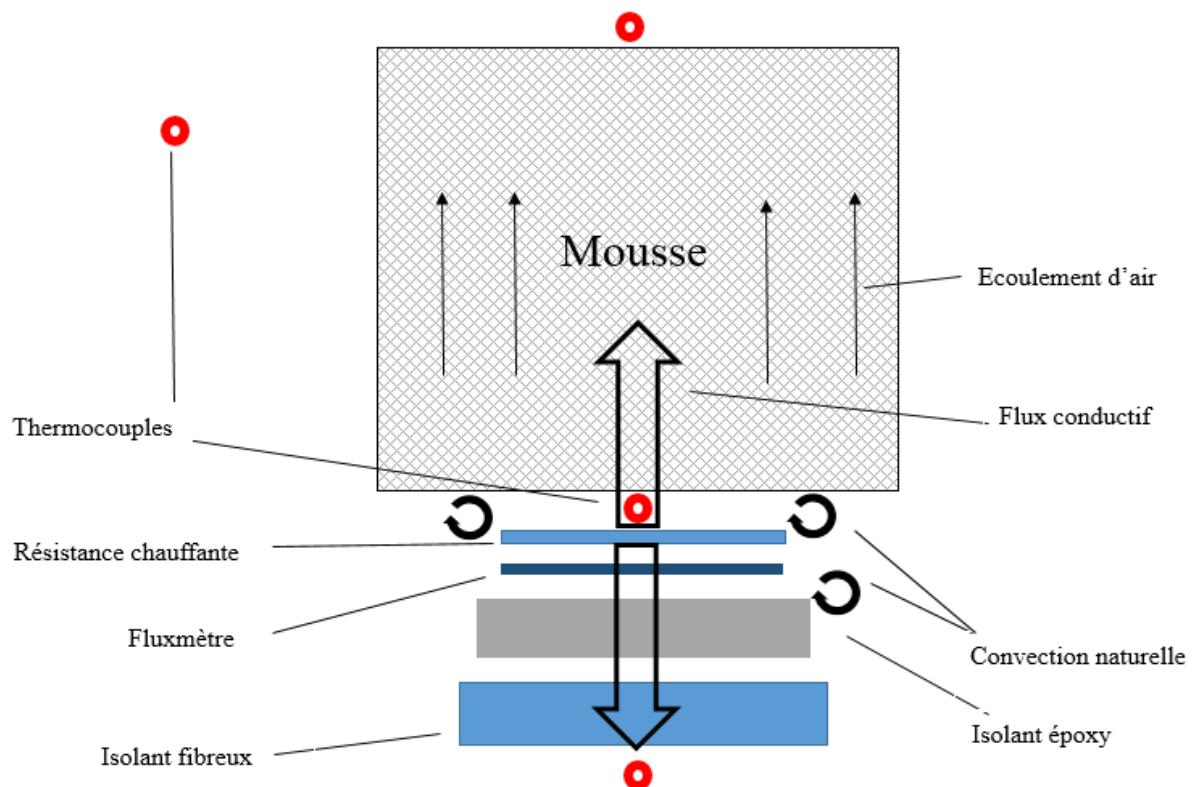



Figure 5. Schéma de principe de la veine d'essai.

Notons que le système de fixation est unique et a été conçu pour l'échantillon Alveotec et ne peut s'adapter que difficilement à d'autres échantillons. Cependant celui permet d'effectuer des mesures sans perturber le panache thermique qui s'élève au-dessus de lui.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 10
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

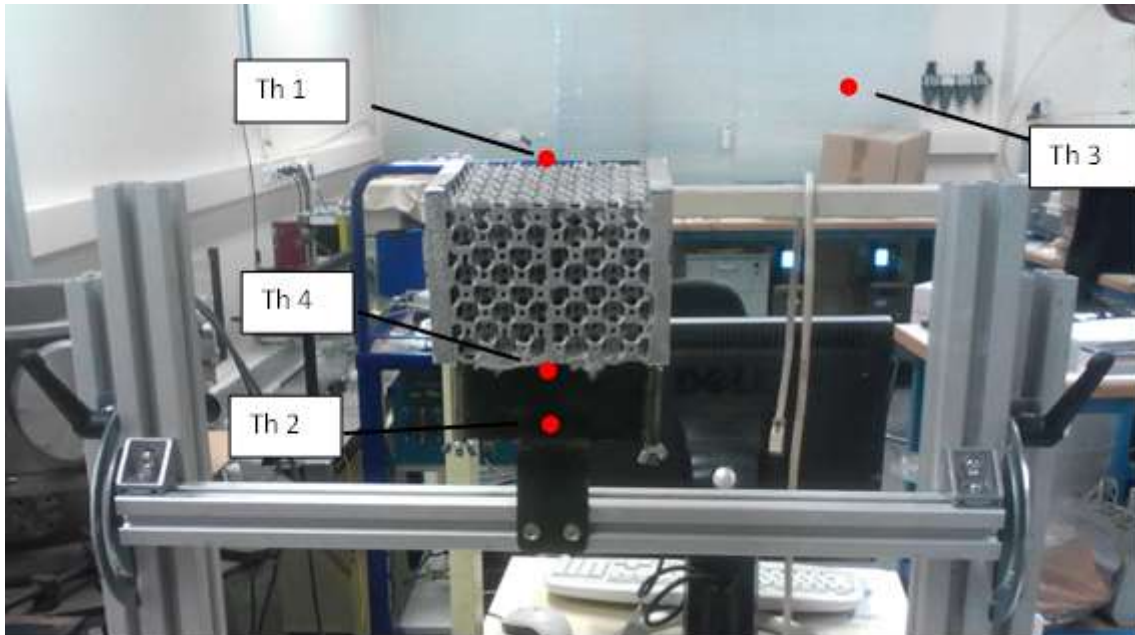




Figure 6. Vue de la veine d'essais instrumentée.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 11
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

3 Protocole expérimental

Le protocole expérimental suivra les étapes suivantes :

- la mousse sera chauffée par conduction par une résistance chauffante plane « plaquée » contre sa base. Pour éviter la présence d'une résistance de contact trop importante on utilise de la pâte thermique que l'on appliquera sur le support et la résistance chauffante. De plus, on prendra soin de diriger la grande majorité du flux vers le haut en positionnant une couche d'isolant sous la cartouche chauffante. Pour ce dernier point on utilisera une plaque de céramique d'environ un centimètre d'épaisseur.
- Attente de l'établissement complet du régime stationnaire : La masse de mousse et de l'armature du dispositif expérimental (bien qu'isolé) vont absorber de la chaleur pendant près d'une heure avant d'atteindre un état stable. Cette condition sera vérifiée pour chaque expérience.
- Une fois la mousse chauffée, le phénomène de convection naturelle est amorcé et l'air va alors circuler du bas vers le haut dans l'échantillon sous l'influence de son changement de densité. On considérera l'air comme un gaz parfait, de plus étant à température ambiante il refroidira la mousse ce qui induit un flux de chaleur évacué par convection. On s'attend donc à observer une température de l'air plus élevée en sortie qu'en entrée et inversement la température en sortie de la mousse sera moins importante que celle en entrée. Pour les mesures, on s'intéressera particulièrement à l'état stationnaire qui est atteint environ une heure après le début de la chauffe. Cet état se caractérise par des températures de contact, d'air sortant et de structure, constantes mais aussi un flux conductif constant reçu par la mousse.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 12
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

4 Résultats et analyses

4.1 Description des mesures

Nous décrivons le procédé de mesure sur un essai : le générateur fournit toujours la même puissance de 26,25 W (soit 37,5V et 0,7 A) dissipée par effet Joule par la résistance chauffante Captec. Comme on le remarque sur la Figure 7, dessous la montée en température est très rapide dans un premier temps puis est un peu moins prononcée ceci étant lié à la capacité thermique de la mousse métallique. La température de contact atteindra enfin 79,5°C pour une température ambiante entre 27 et 28°C.. Concernant la température de sortie d'air, elle suit une augmentation plus régulière pour finalement atteindre 56 °C à l'état stationnaire. Notons que la température de la structure augmente aussi ce qui confirme les pertes par conduction par le support. Une fois ces températures stabilisées, on relève le flux transmis à la mousse à l'aide du fluxmètre et d'un multimètre. Dans ce cas, nous mesurons 16,6 W (63% du flux initial) dirigés vers la mousse. Par conséquent 9,65 W sont perdus. Rappelons qu'au moins une heure est nécessaire pour atteindre cet état stationnaire. Le même temps est nécessaire pour refroidir l'échantillon. De fait, seul 3 à 4 tests par jours sont possibles.

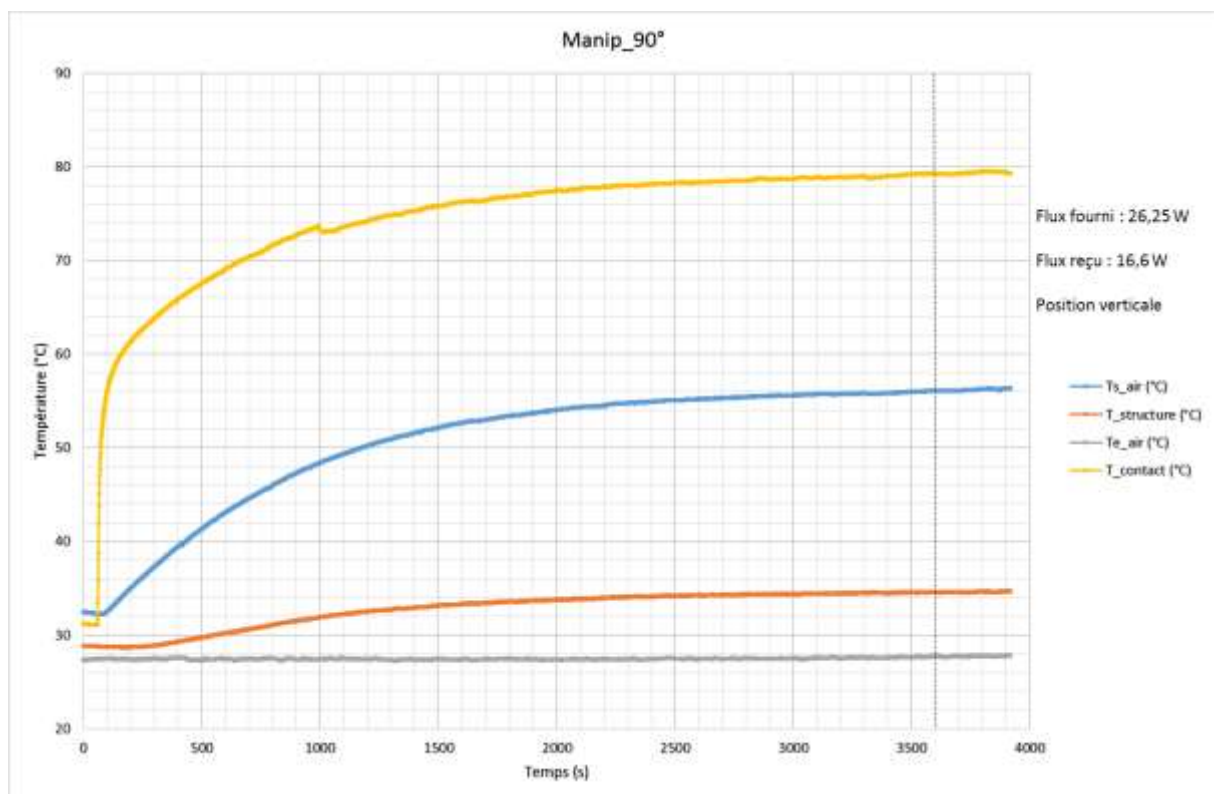



Figure 7. Evolutions des différentes températures mesurées au cours du temps : Etablissement du régime stationnaire pour l'échantillon positionné à l'horizontale.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 13
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

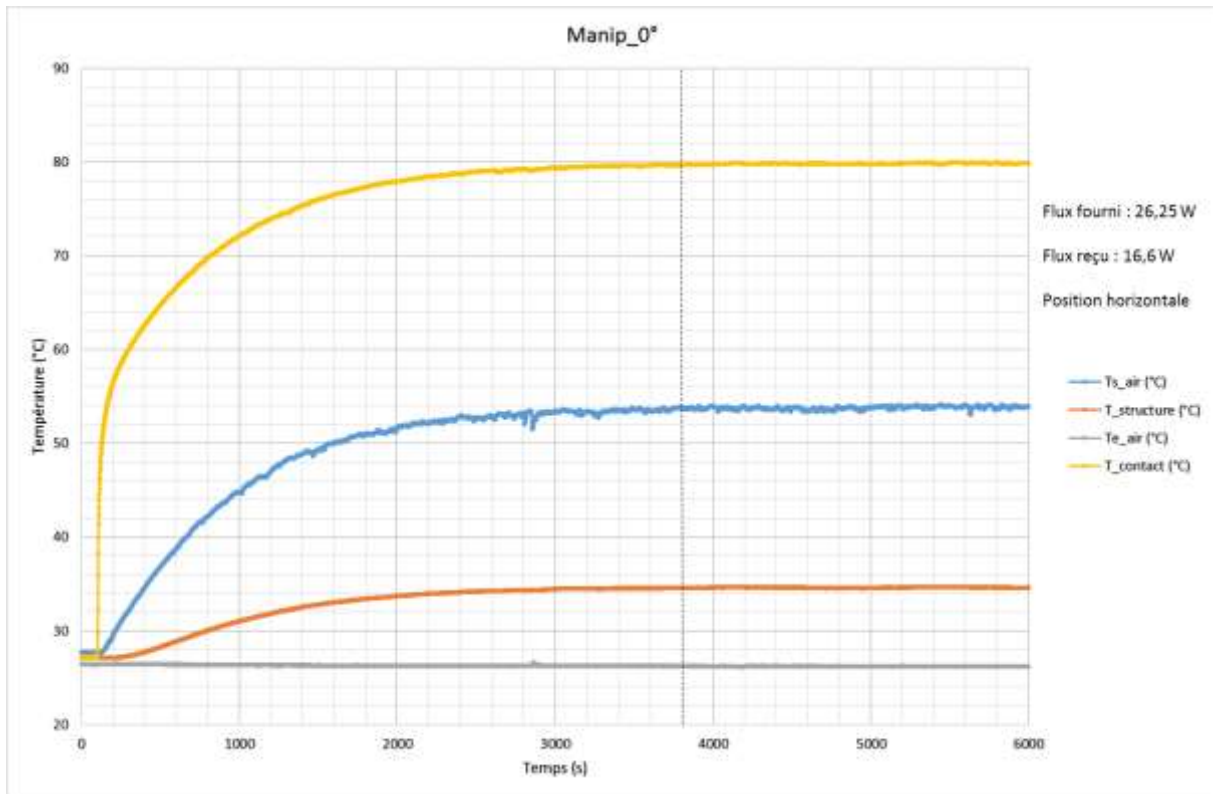


Figure 8. Evolutions des différentes températures mesurées au cours du temps : Etablissement du régime stationnaire pour l'échantillon positionné à la verticale..


4.2 Inclinaison de l'objet

Les conditions expérimentales variant légèrement entre deux expériences, nous définissons un coefficient d'échange de chaleur global de l'échantillon HS (W/K) prenant en compte les variations de flux et de température ambiante :

$$HS = \frac{Q_{\text{mesuré}}}{T_{\text{mesurée}} - T_{\text{ambiant}}} \quad (1)$$

Où $Q_{\text{mesuré}}$ (W) est la puissance thermique mesurée au niveau du fluxmètre, $T_{\text{mesurée}}$ (K) la température mesurée au niveau du contact fluxmètre/échantillon et T_{ambiant} la température ambiante mesurée en dessous de l'échantillon (température d'entrée d'air).

La Figure 9 montre que les performances du dissipateur thermique sont indépendantes de l'angle d'inclinaison du dispositif. En effet, les variations observées entre chaque expériences sont inférieure à 5%, soit aux incertitudes de mesure.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 14
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

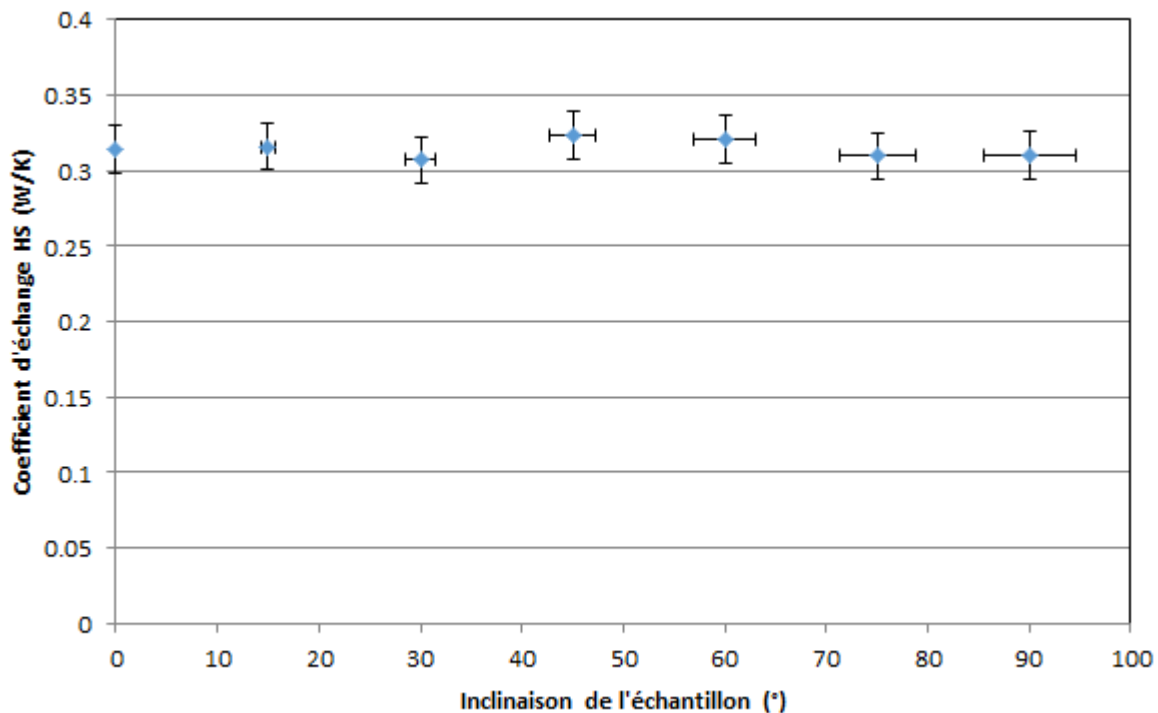


Figure 9. Coefficient d'échange en fonction de l'angle d'inclinaison de l'échantillon


4.3 Influence du flux de chaleur – niveau de température

Le moteur de l'écoulement d'air au travers de la mousse est la différence de pression entre le bas et le haut de la mousse. Cette différence de pression est due à l'écart de température entre l'air chauffé dans la matrice solide et l'air ambiant.

Les résultats suivants montrent l'influence du niveau de température sur les performances globales du dissipateur.

La Figure 10 montre l'évolution de la température de contact en fonction de la puissance thermique dissipée dans l'échangeur à mousse. Pour une gamme de 0 à 20W et une température de 30 à 100°C, le profil de température est quasiment linéaire. Ce résultat tend à montrer que le niveau de température n'a pas d'influence sur les performances globales du dissipateur.

La Figure 11 montre l'évolution du coefficient d'échange en fonction de la puissance dissipée. Ce résultat confirme la tendance précédente. Cependant, il semble que le coefficient d'échange subisse une diminution avec l'augmentation du flux.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 15
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

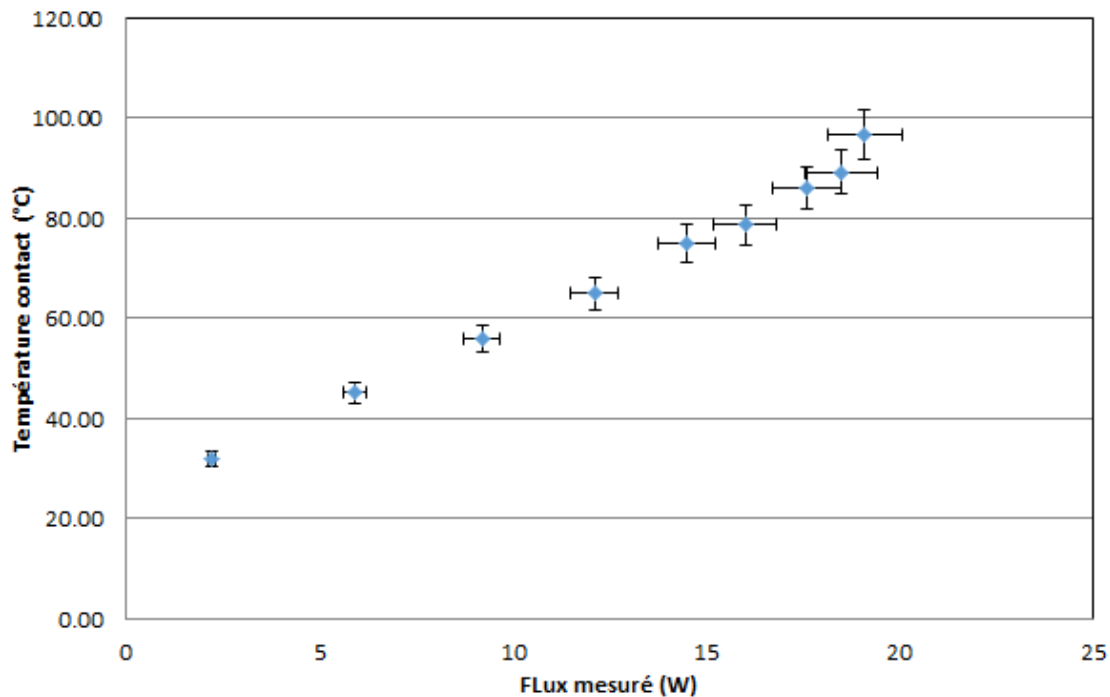


Figure 10. Température de contact en fonction de la puissance thermique dissipée au travers de l'échantillon.


Usuellement, l'amorçage de la convection naturelle et son évolution sont décrites par le nombre sans dimensions Ra (Nombre de Rayleigh)

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_s - T_{ambient}) L_c^3 \quad (2)$$

Où g (m/s^2) est la constante de gravité sur terre, β () Le coefficient de dilatation thermique, ν () la viscosité cinématique, α () la diffusivité thermique, T_s et $T_{ambient}$ les températures respectivement du solide et de l'ambiance et L_c (m) la longueur caractéristiques de l'échantillon.

Pour le cas d'une plaque plane, le coefficient d'échange évolue avec le nombre Rayleigh, et donc avec l'écart de température, à la puissance 1/3.

La Figure 12 montre le coefficient d'échange de chaleur en fonction de l'écart de température à la puissance 1/3. Nous constatons une évolution décroissante de coefficient qui indique une dégradation des performances. Contrairement à la plaque plane, la mousse couple la conduction à la convection qui a pour effet de faire perdre de l'efficacité au dissipateur.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 16
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

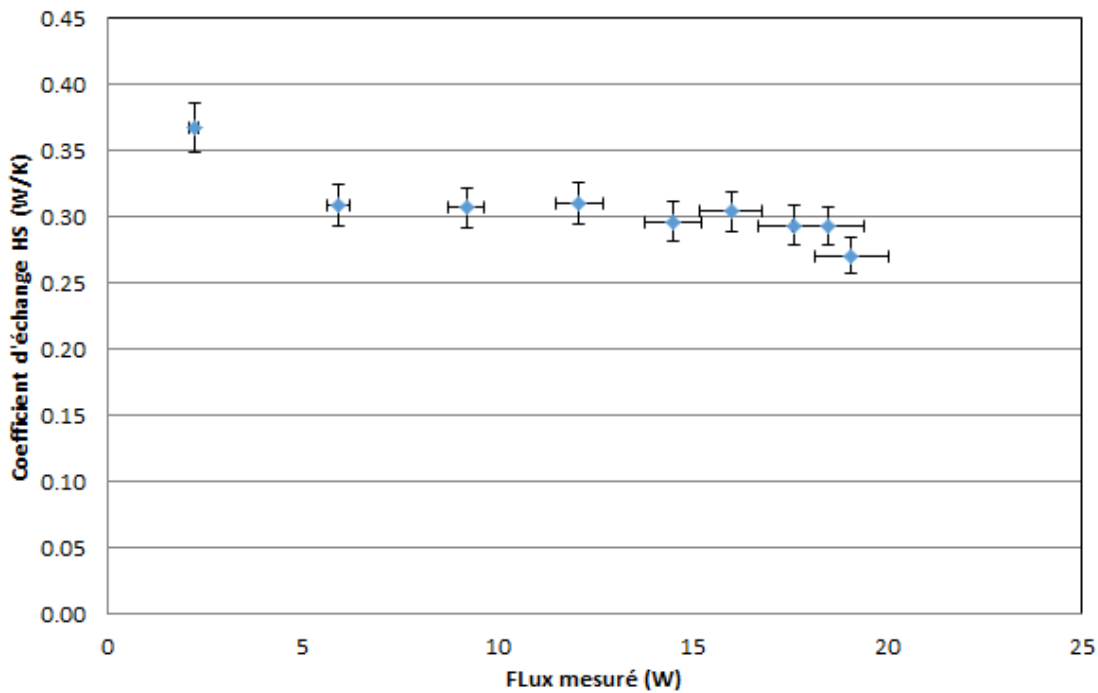


Figure 11. Coefficient d'échange HS en fonction du flux de chaleur dissipé au travers de l'échantillon.

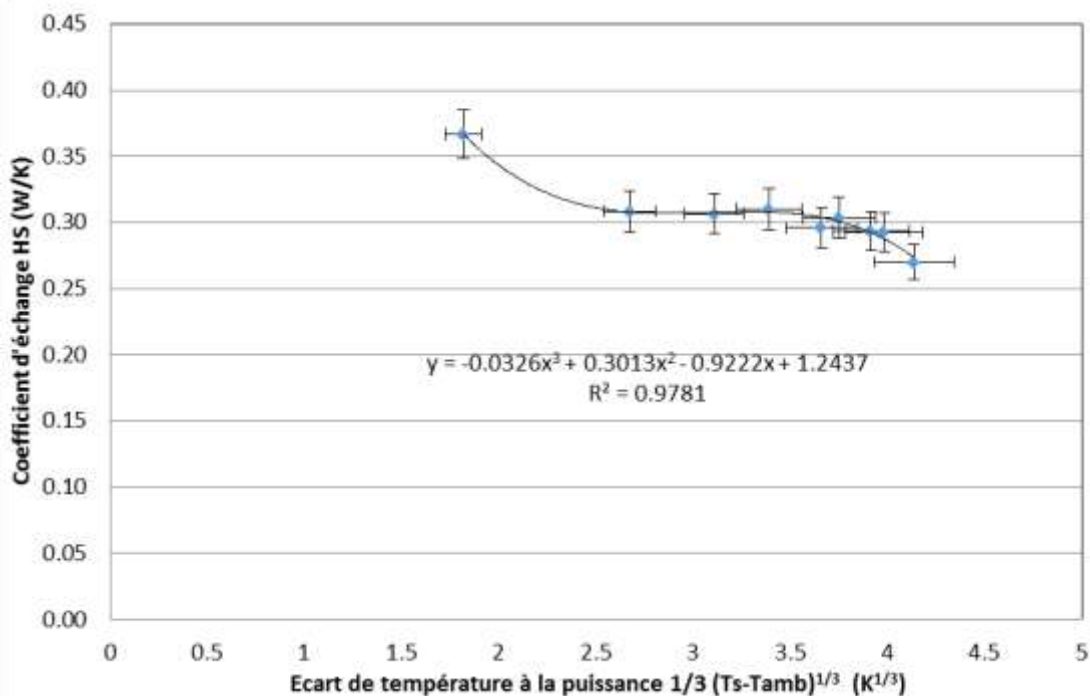



Figure 12. Coefficient d'échange HS en fonction de l'écart de température à la puissance 1/3.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 17
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

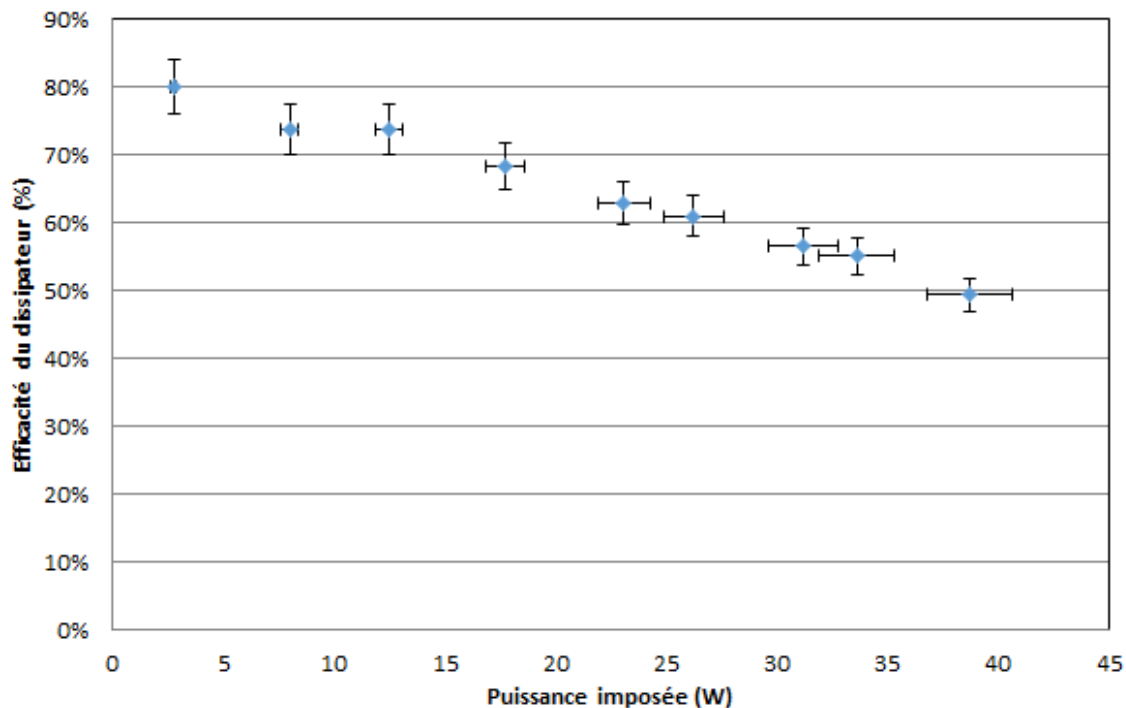


Figure 13. Efficacité du dispositif en fonction de la puissance électrique imposée.


Nous définissons une efficacité du dispositif expérimental de la manière suivante :

$$\varepsilon = \frac{Q_{mesurée}}{Q_{imposée}} \quad (3)$$

Où $Q_{mesurée}$ (W) est la puissance dissipée dans la mousse et mesurée sur le fluxmètre et $Q_{imposée}$ (W) la puissance imposée aux bornes de la résistance chauffante.

La Figure 13 montre la décroissance de l'efficacité du composant en fonction de la puissance électrique imposée. Ce phénomène peut s'expliquer par le couplage perte de charge gradient de pression. En effet le débit d'air circulant au travers de la mousse étant insuffisant, celui s'échauffe jusqu'à atteindre la température la phase solide. Il n'y a alors plus d'échange avec l'air sur toute une partie de la mousse. Cet effet est double, car il a également une influence sur la perte de charge. Sur le haut du dissipateur, le gradient de température de l'air étant faible le gradient de pression l'est également, l'écoulement est donc ralenti par une perte de charge supplémentaire. Dans l'ensemble, le débit d'air diminue et ainsi de suite.

La Figure 14 illustre ce phénomène de couplage. Le graphique de gauche montre l'évolution des températures pour un coefficient d'échange médiocre. A droite pour un coefficient d'échange amélioré. Dans le cas du coefficient d'échange médiocre, l'écart de température entre les phases reste conséquent. La totalité de la mousse est utile aux transferts de chaleur. Dans le cas où le coefficient d'échange est augmenté, seule la base de l'échantillon est efficace. De plus nous pouvons observer une diminution du gradient de température de l'air le long de l'écoulement et donc du gradient de pression.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 18
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

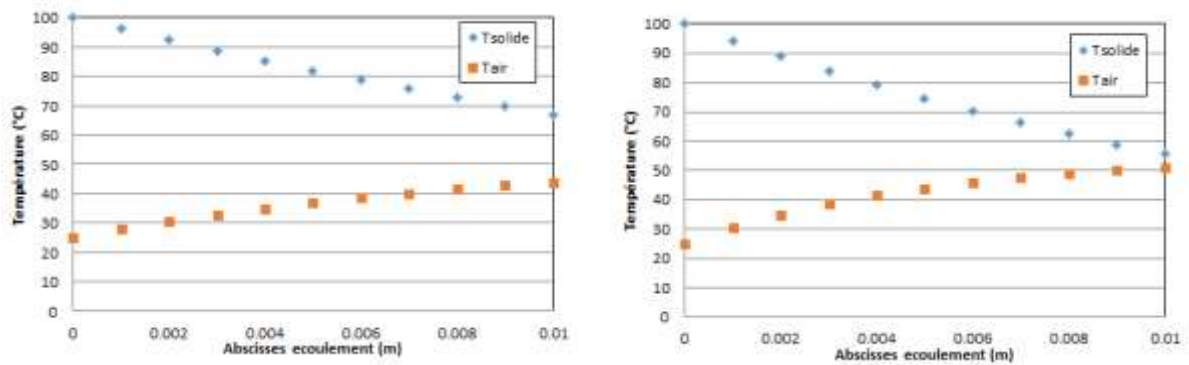



Figure 14. Exemple d'évolution de température. A gauche pour un coefficient d'échange médiocre. A droite pour un coefficient d'échange amélioré.

	REFERENCE Alveotec-201308001-A	Indice A	Auteur(s) – Contact(s) Benoît PAILLETTE Jean-Michel HUGO	Page 19
	TITRE Caractérisation d'un dissipateur par convection naturelle		AFFAIRE Devis n°201305004 du 27/05/2013	

5 Conclusion

Le développement du dispositif expérimental et caractérisation thermique expérimentale du dissipateur Alveotec ont principalement permis de démontrer que les performances étaient indépendante de la direction et de l'inclinaison du dispositif par rapport à l'horizontale. Ce résultat est fort en conséquence pour l'utilisation des mousses comme extension de surface en convection naturelle. Contrairement à des ailettes, le système ne perd pas en performances s'il est incliné, que ce soit volontairement ou involontairement.

Pour ce dernier point, la mousse se rapproche des picots ou « Pin Block » déjà utilisés dans le refroidissement de composants électroniques ou de LED.

Le principal résultat thermique est que pour une puissance de 20W (2.8W/cm²) dissipée par conduction uniquement dans la matrice solide, le point de contact où le flux est imposé ne dépasse les 100°C pour une température ambiante d'environ 25°C. Cependant, l'évolution des profils de température dans le milieu poreux montrent que la géométrie de l'échantillon n'est pas optimale. En effet, le dissipateur perd en efficacité avec l'augmentation de la densité de puissance.

La mousse présente un avantage autre que l'aspect purement thermique. D'un point de vue structurel, la mousse forme un bloc 3D homogène. Contrairement à des picots qui sont forcément posés sur une base et ne peuvent en être dissociés. La mousse permet de laisser libre une partie de la base et donc de laisser se développer un écoulement par convection naturelle.

Cette étude permet de mettre en avant des caractéristiques intéressantes pour l'utilisation des mousses métalliques comme dissipateur de chaleur en convection naturelle. Mais également la nécessité d'effectuer une optimisation de la texture de la mousse mais surtout de la structure/géométrie du dissipateur.

Remarque : les résultats thermiques sont obtenus en ne prenant compte que de la conduction de la chaleur. Lors d'une utilisation pour refroidissement de LED, le rayonnement de la lampe s'ajoute au flux de chaleur dissipé.