

# Conception et réalisation expérimentale d'un caloduc pulsé pour le refroidissement d'une électronique de puissance d'un véhicule hybride

Gwenaël BURBAN<sup>1</sup>, Patrick LAGONOTTE<sup>1,2</sup>, Alain ALEXANDRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LET-ENSMA, UMR CNRS n° 6608, 1, avenue Clément ADER, F-86961 Futuroscope CEDEX

<sup>2</sup>CReA, Centre de Recherche de l'Armée de l'air, BA 701, F-13661 Salon-Air

(auteur correspondant : burban@let.ensma.fr)

**Résumé :** Les contraintes du refroidissement de l'électronique dans le milieu automobile diffèrent de celles du milieu industriel. Les sollicitations et l'environnement sont très différents. La conception de la gestion thermique de l'électronique de traction d'un véhicule est basée non sur un fonctionnement permanent mais sur un profil de mission normalisé. La réalisation et les tests expérimentaux d'un caloduc pulsé, permettant d'évacuer la chaleur d'une électronique située dans le compartiment moteur d'un véhicule, montre le potentiel de ce type de refroidissement passif.

## Nomenclature

$d$	diamètre, $m$	$\sigma$	tension superficielle, $N.m^{-1}$
$g$	accélération, $m.s^{-2}$	Indices et exposants	
Symboles grec		$l$	liquide
$\rho$	masse volumique, $kg.m^3$	$v$	vapeur

## 1. Introduction

L'objectif de réduire les consommations et les émissions de CO<sub>2</sub>, amène à l'heure actuelle de nombreux constructeurs automobiles à vouloir hybrider leurs véhicules. Dans le cadre du PREDIT EPO Auto+ (Electronique de Puissance pour Organes électriques Automobiles) encadré par le pôle MTA, le projet G THERM avait en charge le management thermique de l'électronique de puissance dans différentes applications de véhicule dont une pour la gestion thermique de l'électronique d'un full hybride de 26 kW.

L'utilisation dans un véhicule hybride du moteur électrique comme dans le cas de la Toyota Prius est essentiellement composée de successions d'impulsions ou transitoires, accélérations, démarrage, freinage récupératif. La puissance utilisée n'est pas constante, mais en plus l'énergie est limitée par les batteries à l'exemple de l'autonomie de roulage en tout électrique qui est de 1 km à 50 km/h. Le régime permanent stabilisé de quelques minutes en termes de puissance injectée et en refroidissement est donc inatteignable.

La traction étant principalement thermique, le moteur électrique n'a pas la contrainte d'assumer les conditions extrêmes. Le programme s'est donc orienté vers un dimensionnement pour des profils de missions et dans des conditions thermiques d'environnement défini. Le choix d'un cycle normalisé permet d'inclure d'une part les variations de puissance liées à l'utilisation de la traction hybride, et d'autre part l'évolution en fonction de la vitesse des conditions de refroidissement par air. Le choix de concevoir la gestion thermique de l'électronique pour des profils de missions normalisés et non sur des régimes permanents comme pour les applications industrielles permet comme le montre cette étude d'éviter un surdimensionnement important et inutile.

Le cycle NEDC (NMVEG) d'une Toyota Prius enregistré sur un banc de l'INRETS-LTN, figure 1, nous a servi de base de travail. L'observation du chronogramme montre que la courbe de puissance est très perturbée et que la puissance maximale est rarement atteinte. Les pics apparaissent durant les phases de fortes accélérations et de décélérations. Pour atténuer ces pics de puissance, les masses

inhérentes à la construction de l'électronique, engendrent des capacités thermiques qui vont lisser les pics et répartissent temporellement la puissance à dissiper. La puissance moyenne et les pertes à évacuer restent faibles.

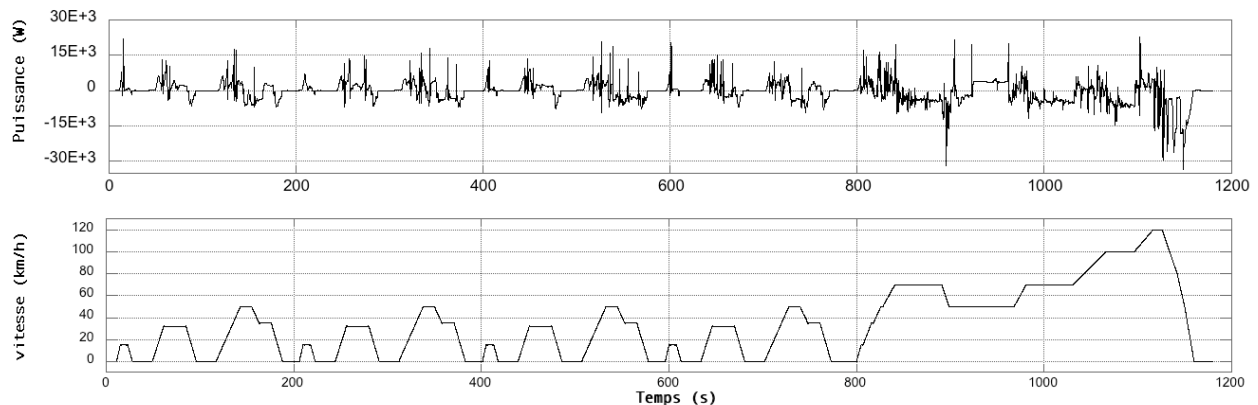


Figure 1 : Relevé de puissance sur le cycle NEDC

Pour éviter d'ajouter un radiateur avant supplémentaire, il a été envisagé d'utiliser un emplacement légèrement ventilé sous capot. Un dispositif de refroidissement permettant d'extraire des puissances moyennes faibles est réalisable avec un simple radiateur, mais seul le caloduc peut assurer la fonction de déport qui est ici d'une dizaine à une trentaine de centimètres. Le caloduc a l'avantage d'être entièrement passif sans pièces mécaniques en mouvement.

Le cahier des charges utilisé dans l'étude doit tenir compte de l'emplacement cloisonné et de la variation temporelle de la puissance. Les conditions de l'air sont de 80°C pour la température et de 5% de la vitesse du véhicule pour la vitesse d'air ce qui correspond à un emplacement légèrement ventilé. Les dissipations thermiques de l'électronique sont estimées à 3% de la puissance de traction électrique soit des puissances crêtes de 800 W. La température limite des composants est de 175°C.

## 2. Modélisation et dimensionnement

Pour dimensionner le caloduc, un modèle thermique pour des régimes transitoires a été développé sous le logiciel ESACAP. Il contient un transistor IGBT avec sa diode en antiparallèle, le DBC, la semelle et la graisse d'interface. La puissance est injectée suivant les phases d'accélération ou de décélération sur la diode ou sur l'IGBT. L'évaporateur du caloduc est constitué d'un diffuseur à ailettes. Le modèle tient compte de l'échange entre parois et fluide avec un coefficient d'échange qui augmente en fonction du flux.

Coté condenseur, qui assure l'évacuation du flux sur l'air, le modèle intègre les échanges entre le fluide et la paroi du tube, puis de l'efficacité des ailettes, placé autour du tube, en intégrant les effets de conduction dans les ailettes et de convection entre l'air et les ailettes. Ces échanges sont liés à la vitesse du véhicule. Si elle est inférieure à 7 km/h, on calcule un coefficient de convection naturelle ( $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ), au-delà c'est un coefficient d'échange en convection forcée (12 à  $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Le modèle permet ainsi d'optimiser la surface d'échange au condenseur, ainsi que sa géométrie notamment l'espacement d'ailettes pour la convection naturelle. L'évaporateur a pour rôle de filtrer les pics puissance et de répartir la chaleur vers le fluide. Une fois les paramètres géométriques ajustés, une simulation sur deux cycles NEDC (NMVEG) successifs a été effectuée et montre la capacité du modèle du dispositif de refroidissement à évacuer l'énergie sans l'accumuler, figure 2.

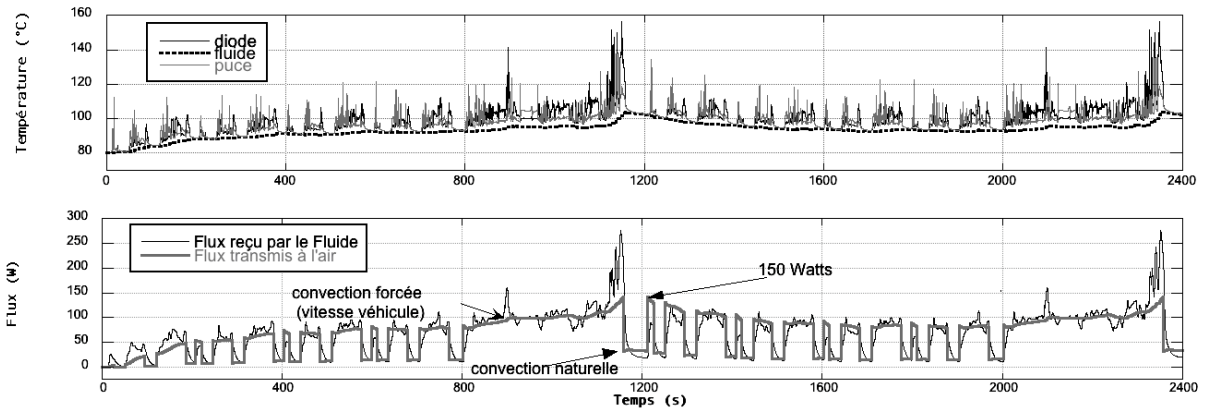


Figure 2 : Evolution des températures composants et du flux évacué sur une simulation de deux cycles

La modélisation a servi à ajuster la surface d'échange du condenseur vers  $0,5\text{m}^2$ . Le cas  $0,25\text{m}^2$  était trop juste dans les simulations, au-dessus c'est de la masse en trop, les performances sont certes meilleures mais pas utiles. Les résultats obtenus sur ce profil de mission confortent la possibilité d'utiliser un caloduc comme dispositif de refroidissement. Le cycle utilisé n'est pas sévère néanmoins les conditions de température et de vitesse sont probablement plus contraignantes que la réalité.

Le modèle met bien en avant les deux échelles de temps, celle de l'électronique qui réagit instantanément et celle du caloduc dont les inerties sont de l'ordre de la minute. Pour l'électronique, l'important est de maintenir la semelle à une température inférieure à  $110^\circ\text{C}$ , puisque quelque soit la puissance à évacuer elle peut être décrite avec une impulsion courte mais de puissance maximale, la contrainte de température est alors instantanée. Il n'est donc pas envisageable avec de faible puissance de laisser la température de la semelle montée au-delà de  $110^\circ\text{C}$ , sauf si un dispositif de limitation de puissance en fonction de la température est installé. Pour l'électronique c'est l'écart de température à puissance maximale, soustrait à la température limite du composant qui donne la température limite de la semelle. Le caloduc est dimensionné par les conditions d'utilisations.

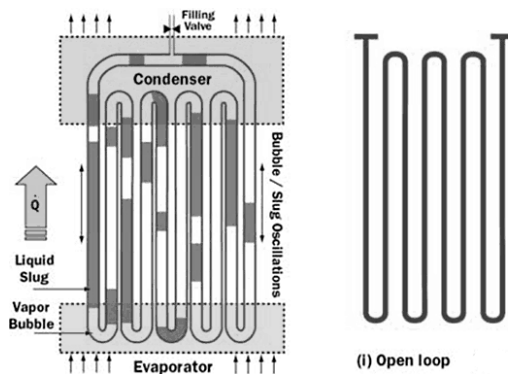


Figure 3 : Schéma du caloduc pulsé représentant le circuit et les bouchons de liquides et de vapeur

### 3. Réalisation expérimentale

Le choix du type de caloduc s'est porté sur un caloduc pulsé (Pulsating Heat Pipe), figure 3. Bien que la compréhension physique de son fonctionnement reste encore complexe [1] [2], il offre des avantages non négligeables comme sa simplicité de conception compatible avec le milieu automobile, et son aptitude à fonctionner dans des positions défavorables.

L'étude expérimentale s'est portée d'une part sur une caractérisation précise du caloduc pulsé en régime permanent en fonction de plusieurs paramètres, choix du fluide de travail, puissance injectée, conditions de refroidissement avec différentes températures et vitesses d'air et d'autre part sur des tests de cycle NEDC (NMVEG). Les tests effectués reproduisent le cycle normalisé à travers la

puissance injectée, la vitesse et la température d'air. La conception et l'instrumentation du banc ont été étudiées à cet effet.

Le caloduc est constitué d'un évaporateur sensé recevoir un module IGBT, d'un tube de 3,2 mm (2,5 mm interne) effectuant 16 aller retour pour transporter la chaleur vers le condenseur à ailettes pour l'évacuer sur l'air. Il s'agit ici d'un prototype expérimental en cuivre pour des questions de compatibilité de fluide (notamment l'eau) et de réalisation en interne. Une structure industrielle en aluminium plus aboutie permettrait sûrement une intégration dans un véhicule.

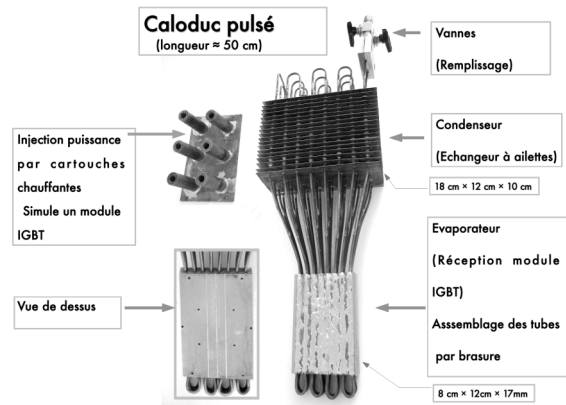


Figure 4 : Caloduc réalisé

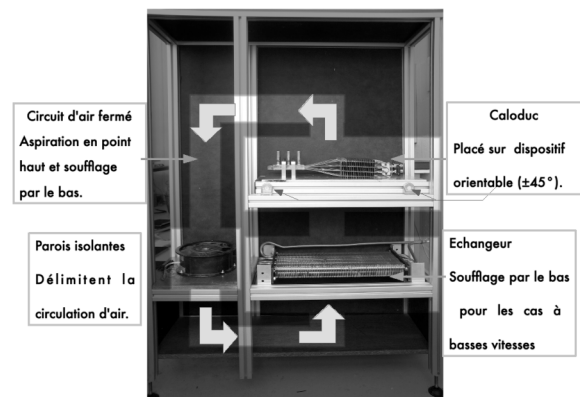


Figure 5 : Banc d'essais

Le prototype a été instrumenté avec 40 thermistances préalablement étalonnées, et dix thermocouples pour l'injection de puissance. Deux thermocouples fins de 12  $\mu\text{m}$  sont employés pour la régulation de température d'air. Le banc de test est constitué d'une enceinte régulée en température par un échangeur assisté d'un thermocryostat, et d'un ventilateur contrôlé par un variateur de vitesse. Une alimentation stabilisée injecte à travers des cartouches chauffantes la puissance à l'évaporateur. L'ensemble est entièrement piloté par un programme effectué sous LABVIEW. Celui-ci gère automatiquement l'incrémentement des différents paramètres. Deux types d'étude ont été réalisées l'une en régime stabilisé pour la caractérisation, l'autre avec des cycles pour vérifier l'aptitude du caloduc en régime transitoire. Le banc permet un contrôle temporel de la puissance, de la vitesse d'air et régule la température d'air à sa consigne.

### 3.1. Caractérisation du caloduc

Ce caloduc a fait l'objet d'une caractérisation très complète en fonctions de plusieurs paramètres :

- Fluide : Méthanol, Eau, Acétone, N-pentane, R134A
- Inclinaison :  $+45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$  (évaporateur en dessous du condenseur, cas favorable et inversement pour le cas défavorable)
- Température d'air : 10 à  $60^\circ\text{C}$  par pas de  $10^\circ\text{C}$
- Vitesse d'air : 0,25 m/s à 1,8 m/s par pas de 0,25 m/s
- Puissance : de 25 W à 600 W (limité à 300 W pour des cas limites en température)

La résistance thermique du caloduc décroît lorsque la puissance augmente pour tendre vers une asymptote aux puissances les plus élevées. Ce comportement est en grande partie lié au fluide comme le montre les figures 6 et 7.

La figure 6 concerne des mesures effectuées avec une température d'air fixée à  $10^\circ\text{C}$ , et  $60^\circ\text{C}$  pour la figure 7. Celles-ci montrent l'influence du choix du fluide sur les performances, notamment le R134A qui n'a pas de performances correctes. Les quatre fluides peuvent être scindés en deux catégories. D'une part le N-pentane et l'acétone qui répondent très rapidement à basse puissance et aux basses températures, ici 50 W et  $10^\circ\text{C}$ , mais dont les performances se dégradent à forte puissance et température plus élevée 300 W et  $60^\circ\text{C}$ . De l'autre l'eau et le méthanol qui sont peu performants à basse température, température évaporateur de  $60^\circ\text{C}$  (au lieu de  $25^\circ\text{C}$ ) pour une température d'air de  $10^\circ\text{C}$  et 50 W injectée, mais dont les performances sont stables à des températures plus élevées.

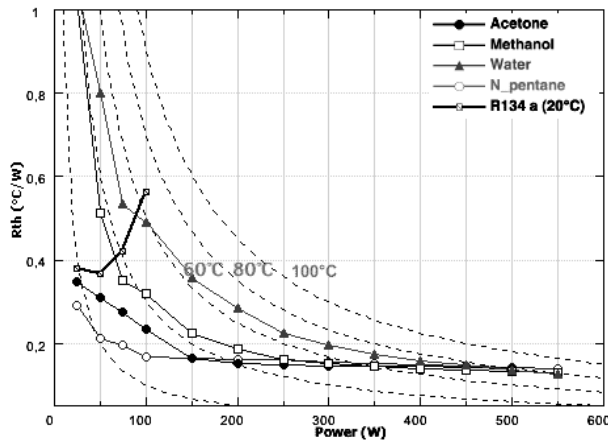


Figure 6 : Résistance thermique, air 10°C

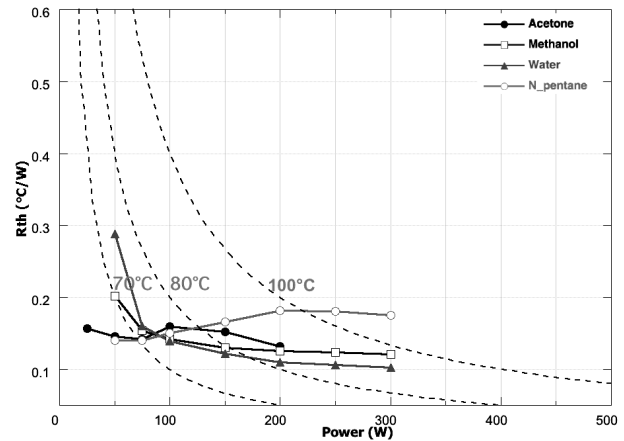


Figure 7 : Résistance thermique, air 60°C

### 3.2. Diamètre critique

Dans un caloduc classique, les performances sont évaluées à partir de la température adiabatique, qui est une zone neutre reflétant la température du fluide. Dans le cas du caloduc pulsé, il n'est pas possible de définir une température de référence. La température de l'air et la puissance injectée modifie la plage de température de fonctionnement du caloduc et donc les propriétés thermophysiques du fluide, notamment, masse volumique vapeur et liquide, viscosité, chaleur latente et tension superficielle. Certaines propriétés tendent à améliorer les performances, d'autres à les dégrader.

Le fonctionnement du caloduc pulsé repose sur l'existence de bouchons liquide et vapeur liés au diamètre interne du tube (2,5 mm pour notre prototype) et à la tension superficielle du fluide qui se modifie avec la température. La formule du diamètre critique (eq. 1) appliquée dans le tableau 1 donne pour le R134A, un diamètre critique inférieur au diamètre du tube, ce qui peut expliquer partiellement ses mauvaises performances avec cette géométrie. Le N-pentane a un diamètre critique qui s'approche du diamètre du tube à 80°C. Une baisse des performances a effectivement été constatée vers ces températures.

$$d_{critique} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v)g}} \quad (1)$$

Température	Eau	Acétone	Méthanol	R134a	N-pentane
0°C	5,58	3,62	3,51	1,9	3,37
20°C	5,44	3,4	3,43	1,65	3,23
40°C	5,34	3,36	3,34	1,5	3,04
80°C	5,12	3,04	3,25	1,3	2,8

Tableau 1 : Diamètre critique en mm pour différents fluides en fonction de la température

### 4. Essais avec cycles normalisés

Le cycle NEDC (NMVEG) de référence a été modifié et lissé pour répondre aux capacités et constantes de temps du banc, notamment l'injection de puissance dont la constante est d'environ 10 s. Les tests sont effectués avec 3 cycles successifs, le premier cycle étant souvent une montée en température bien que les essais démarrent avec une faible puissance injectée et une température d'air stabilisée à 80°C. L'aspect haché de la température d'air est certainement plus un problème de mesure qu'une réalité.

Les essais ont été effectués pour différents fluides et cas de figure. Les résultats obtenus pour l'eau avec une inclinaison nulle montre que la température de l'évaporateur sensé recevoir l'électronique reste en dessous de 100°C. Les zones critiques concernent la circulation sur autoroute à 120 km/h et la forte décélération finale du cycle. La phase de freinage récupératif est contraignante du fait de la

diminution des échanges liés à la baisse de la vitesse. Dès que la ventilation redémarre, la température de l'évaporateur s'abaisse. Dans des conditions défavorables comme pour l'acétone figure 9, la température n'excède pas 110°C, ce qui montre un bon fonctionnement du caloduc avec une légère dégradation des performances. Nous constatons la similitude des cycles successifs, bien que le fonctionnement du caloduc pulsé est considéré comme difficile à prédire, il a montré dans notre cas un comportement assez bien reproductible.

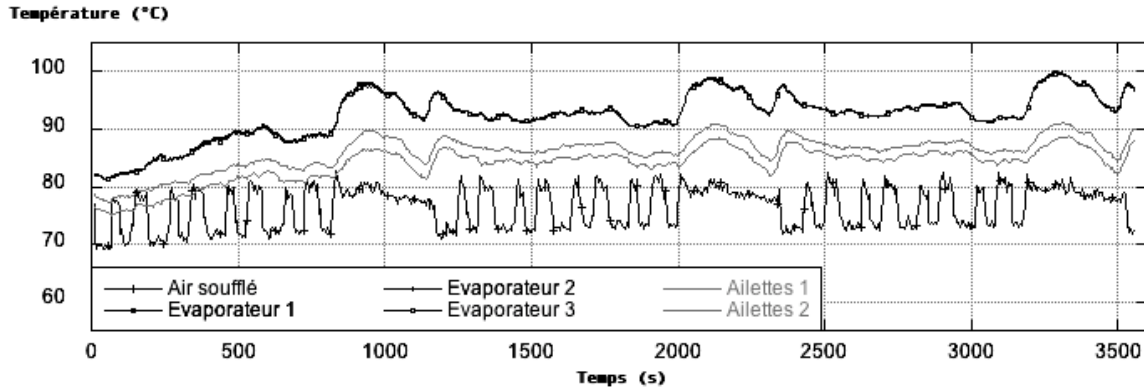


Figure 8 : Résultats sur trois cycles NEDC successifs ; fluide eau, angle 0°, air 70 à 80°C

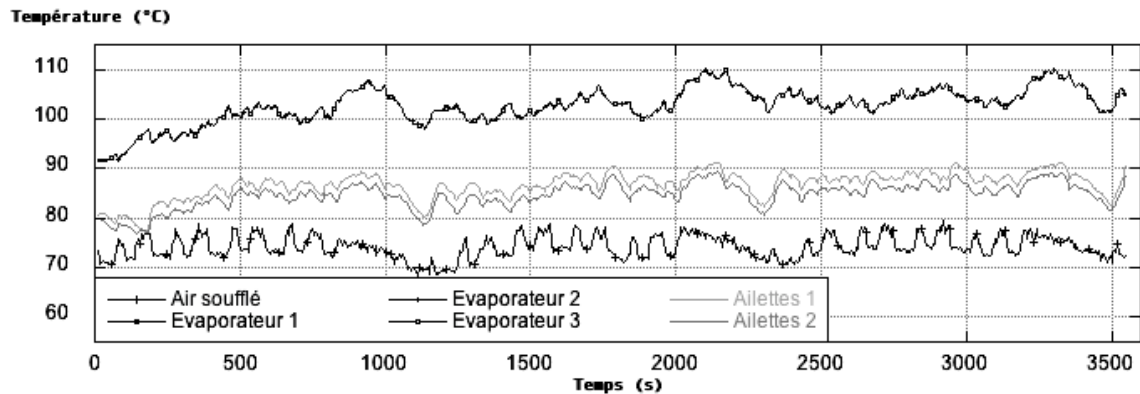


Figure 9 : Résultats sur trois cycles NEDC successifs ; fluide acétone, angle -45°, air 70 à 80°C

## 5. Conclusion

La conception avec des profils de mission a l'avantage de tenir compte des spécificités de l'électronique de puissance, de l'utilisation de la traction hybride et de l'environnement thermique sous capot lié à la vitesse du véhicule. Les essais expérimentaux ont montré la capacité et la robustesse de la technologie du caloduc pulsé, à la fois sur des régimes permanents et sur des cycles. Ce système simple à réaliser et pourtant complexe pourrait en faire une solution bien adaptée aux exigences du milieu automobile.

## Références

- [1] S. Khandekar, Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes, *Doctoral dissertation, Universitaet Stuttgart, Germany, (2004)*
- [2] A. Bensalem, Contribution à l'analyse du comportement de caloducs oscillants à finalité spatiale par voie expérimentale et numérique, *PhD Thesis, Université de Poitiers, France, (2008)*