

Analyse fluxmétrique des effets de fuites sur les températures du compartiment moteur – Application de nouvelles méthodes

Mahmoud KHALED^{1,2*}, Fabien HARAMBAT², Hassan PEERHOSSAINI¹

¹Laboratoire de thermocinétique, CNRS-UMR 6607, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes
Rue C.Pauc, BP 50609 - 44 306 Nantes cedex 3

²PSA Peugeot Citroën

2, route de gisy - 78 943 Vélizy Villacoublay

*(auteur correspondant : mahmoud.khaled@mpsa.com)

Résumé – L'impact des fuites sur les températures du compartiment moteur d'un véhicule automobile a été mis en évidence [1]. La présente étude consiste en une analyse par mesures de flux thermiques de ces effets. Nous montrons les mesures de thermique sous-capot réalisées en soufflerie sur un véhicule. Le compartiment moteur est instrumenté avec environ 40 thermocouples de peau et d'air et 20 fluxmètres à gradient normal. Les mesures sont faites pour trois points de fonctionnement thermiques différents. Trois configurations de fermeture des zones de fuites sont étudiées.

Nomenclature

DAE	direction assistée électronique	<i>Symboles grec</i>	
h	coefficient de convection	φ	densité de flux, $W.m^{-2}$
n	régime moteur, $tr.min^{-1}$	ε	émissivité
PT-FCT-1	point de fonctionnement 1	σ	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$
PT-FCT-2	point de fonctionnement 2	<i>Indices et exposants</i>	
PT-FCT-3	point de fonctionnement 3	c	convective
P	puissance aux roues, KW	f	fluide
R	rapport de vitesse	p	paroi
RAS	refroidisseur d'air suralimenté	r	radiative
T	température, $^{\circ}C$	R	roues
V	vitesse, $Km.h^{-1}$	V	vent

1. Introduction

Les zones de « fuites » d'air du compartiment moteur se situent essentiellement au niveau des jonctions du capot avec la calandre, les ailes, les optiques et le pare-brise. Dans les calculs numériques (aérodynamiques et aérothermiques), ces fuites ne sont généralement pas modélisées. Cependant, des études ont montré que l'influence des fuites sur la traînée de refroidissement était négligeable. Ainsi, une non prise en considération de ces dernières dans les calculs aérodynamiques n'impacte pas les résultats. A contrario, en thermique, des mesures de températures dans le compartiment moteur [1] ont montré que la fermeture des zones de fuites augmente les températures aussi bien en phase de roulage qu'en coup de chaud. Le coup de chaud correspond à l'arrêt du véhicule après une charge thermique importante. Les zones testées sont la zone moyenne et basse du sous-capot et les écarts mesurés en coup de chaud sont plus significatifs que ceux en roulage. En effet, les débits d'air dans le sous-capot sont beaucoup plus grands en roulage qu'en coup de chaud. Ainsi, la perte relative de débit rentrant due à la fermeture des fuites est plus importante en coup de chaud qu'en roulage. Cependant, dans la partie haute du sous-capot et pour certaines positions, on

peut s'attendre à des vitesses en roulage plus élevées que dans les parties moyennes et basses, étant donné qu'elle représente la partie du sous-capot la moins encombrée. Donc les débits d'air empêchés par la fermeture des fuites en roulage deviennent plus négligeables par rapport aux débits d'air entrés en partie haute qu'en autres parties. En coup de chaud, étant donné que la partie haute du sous-capot est la plus proche des zones de fuites, ces dernières représentent les sources principales d'apports d'air à cette région et donc la perte de débit induite par la fermeture des fuites est plus importante dans le haut du sous-capot. Ainsi deux questions se posent : les effets des fuites en roulage sur les températures de la partie haute du sous-capot ne doivent-ils pas être moins significatifs ? Pour la même partie, les effets des fuites en coup de chaud ne doivent-ils pas être plus significatifs ?

Pour répondre à ces questions et pour compléter l'analyse sur les températures sous-capot décrite en [1], il s'avérait important d'étudier l'impact des fuites également d'un point de vue des flux thermiques. Nous avons donc réalisé des mesures de flux globaux, mais également des flux radiatifs et convectifs, mesurés séparément. Notre analyse est en deux parties : une première consistant à répondre aux deux questions ci-dessus et à coupler entre les évolutions de températures et celles de densités de flux globaux aux surfaces, une deuxième permettant une analyse des évolutions de densités globales en termes de densités de flux convectifs et radiatifs en appliquant une nouvelle méthode de mesures de flux convectif et radiatif séparés. Nous décrivons dans une première partie les modalités des essais ainsi que le principe de notre méthode de mesure de flux séparés (&2). Nous exposons ensuite les résultats (&3) et les analyses physiques apportées par les mesures de flux convectifs et radiatifs séparés.

2- Expérience

2.1- Modalités des essais

Les essais thermiques sont réalisés sur un véhicule en soufflerie S4 de Saint-Cyr l'Ecole. Le moteur de la voiture est en marche avec les roues avant entraînant des rouleaux qui permettent la fixation et le contrôle de la puissance aux roues et de leur vitesse de rotation. Les essais sont faits pour les trois points de fonctionnement du tableau 1.

	V_R	V_V	P	R	n
	$Km.h^{-1}$	$Km.h^{-1}$	KW	-	$tr.min^{-1}$
PT-FCT-1	90	90	69	5	2600
PT-FCT-2	110	55	89	4	3800
PT-FCT-3	130	130	98	5	3780

Tableau 1 : Paramètres définissant les trois points de fonctionnement thermiques étudiés.

Trois configurations de fermeture de fuites sont testées : tout ouvert, la jonction capot-calandre fermée, toutes les zones de fuites sont fermées. Pour chaque essai (point de fonctionnement thermique et configuration de fuites fixés), l'enregistrement de données (températures et flux) couvre trois phases successives : le roulage, le ralentissement et le coup de chaud. La phase de roulage représente le roulage réel d'un véhicule ; elle peut être PT-FCT-1, PT-FCT-2 ou PT-FCT-3. Le ralentissement est simulé en soufflerie en coupant le vent et en passant au point mort après la phase de roulage.

2.2- Instrumentation

Le sous-capot de la voiture utilisée pour les essais est instrumenté par environ 40 thermocouples de surface et d'air et 20 fluxmètres à gradient normal. Les régions instrumentées sont essentiellement celles du côté de la boîte froide (zone comprenant le calculateur et la batterie), du devant et dessus de la boîte froide, du filtre à air, du couvre culasse, du tuyau de l'entrée du refroidisseur d'air suralimenté RAS, de l'élastomère coté droit du moteur, et du tuyau de sortie du RAS. Nos capteurs de mesures de flux convectifs et radiatifs séparés sont fixés par paires sur les surfaces à l'aide d'une colle conductrice (l'Araldite AV 138M + durcisseur HV 998). Le principe de notre capteur est de placer sur une surface donnée deux fluxmètres à gradient normal d'émissivités différentes (par exemple en les peignant de couleurs différentes). Dans ce cas, nos deux fluxmètres vont mesurer la même densité de flux convectif mais des densités de flux radiatifs différentes. Ainsi, nos deux fluxmètres vont mesurer des densités de flux globales (la somme des densités de flux convectifs et des densités de flux radiatifs) différentes. Ensuite, à partir des émissivités des deux fluxmètres préalablement connues ainsi que des deux densités de flux globaux mesurées par les deux fluxmètres, nous pouvons monter aux deux densités de flux convectifs et radiatifs. Des essais préliminaires sur une plaque plane aussi bien en convection naturelle qu'en convection forcée ont montré que notre nouvelle méthode de mesures de flux convectifs et radiatifs séparés a une précision supérieure à 90%. Le temps de réponse de chacun des deux fluxmètres est de l'ordre des 0,1 secondes.

3- Résultats

3.1- Effets des fuites sur les températures sous-capot

Nous avons calculé les écarts relatifs de températures dues à la fermeture des fuites suivant la méthode quantitative d'identification des effets (décrite dans [1], [2], [3]) aussi bien en roulage qu'en coup de chaud. En comparant avec les écarts relatifs de températures dus à la fermeture des fuites dans les zones moyennes et basses, nous avons remarqué que l'effet des fuites sur les températures des organes dans la partie haute du sous-capot est moins important.

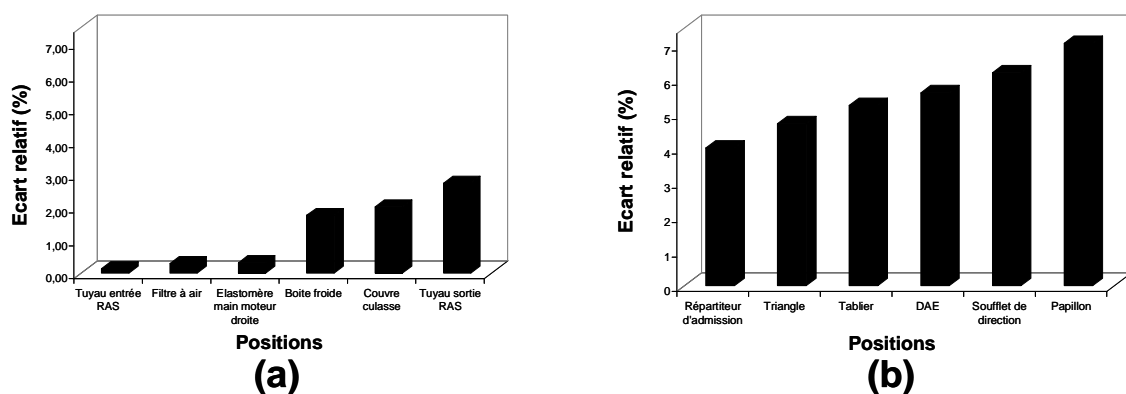


Figure 1 : Écarts relatifs de températures en roulage dues à la fermeture des fuites dans : (a) la partie haute (b) les parties moyenne et basse.

La Figure 1 montre les écarts relatifs de températures maximaux entre les trois points de fonctionnement dus à la fermeture des fuites en roulage, respectivement pour des organes de la partie haute (Figure 1-a) et des organes des parties centrale et basse. D'après la Figure 1-a, nous observons que les écarts relatifs de températures dans la partie haute varie de presque

0% au niveau du tuyau entrée RAS jusqu'à 2,7% au niveau du tuyau sortie RAS. D'autre part, nous remarquons que ces écarts sont plus significatifs dans les parties moyennes et basses (Figure 1-b) où ils varient de 4% au niveau du répartiteur d'admission jusqu'à 7% au niveau du papillon. D'autre part, en coup de chaud, on observe bien que les effets des fuites sur les températures de la partie haute sont du même ordre de grandeurs que dans les parties moyenne et basse (Figure 2).

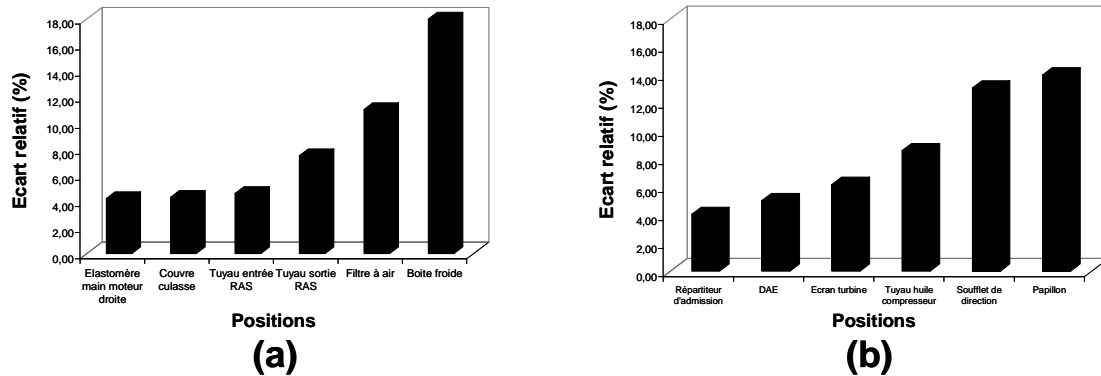


Figure 2 : Ecart relatif de températures en coup de chaud dues à la fermeture des fuites dans : (a) la partie haute (b) les parties moyenne et basse.

3.2- Couplage température-densité de flux global en coup de chaud

La Figure 3 montre respectivement les températures et les densités de flux globaux mesurées en coup de chaud et adimensionnalisées par rapport à celles de la configuration tout ouvert.

Nous observons que la fermeture des fuites augmente les densités de flux globaux absorbées et diminue les flux évacués. A titre d'exemple, la densité de flux global absorbée au niveau de la boîte froide est augmentée d'un facteur 1.75 en fermant les fuites et celle dissipée au niveau du couvre culasse tend quasiment vers zéro. Ces modifications de densités de flux globaux échangées à la surface sont à l'origine des augmentations de températures induites par la fermeture des fuites (Figure 3-a).

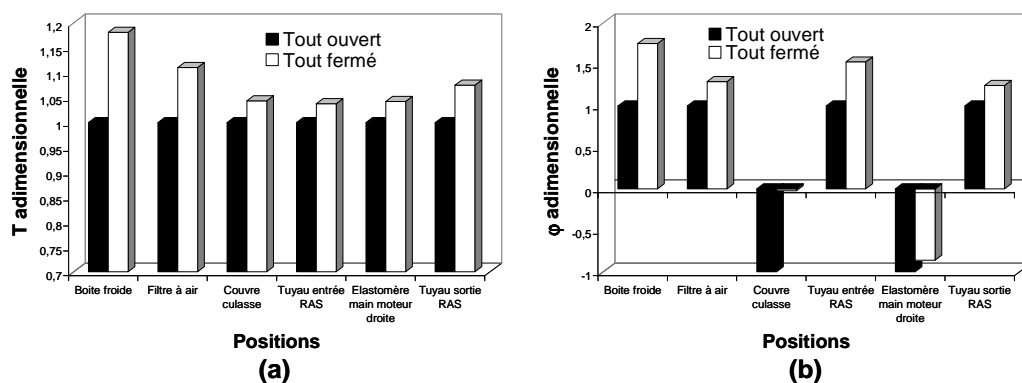


Figure 3 : (a) Température adimensionnelles (b) Densités de flux globaux adimensionnelles ; au niveau des différents organes testés pour les deux configurations tout ouvert et tout fermé en coup de chaud.

3.3- Analyse par mesure de flux séparés

Les évolutions de densités de flux globaux imposent en grande partie celles des températures de surface. Pour analyser leurs évolutions, nous avons procédé à celles des flux

convectifs et radiatifs séparés (montrés sur la Figure 4). Ces densités de flux sont adimensionnées par rapport à celles mesurées en configuration tout ouvert.

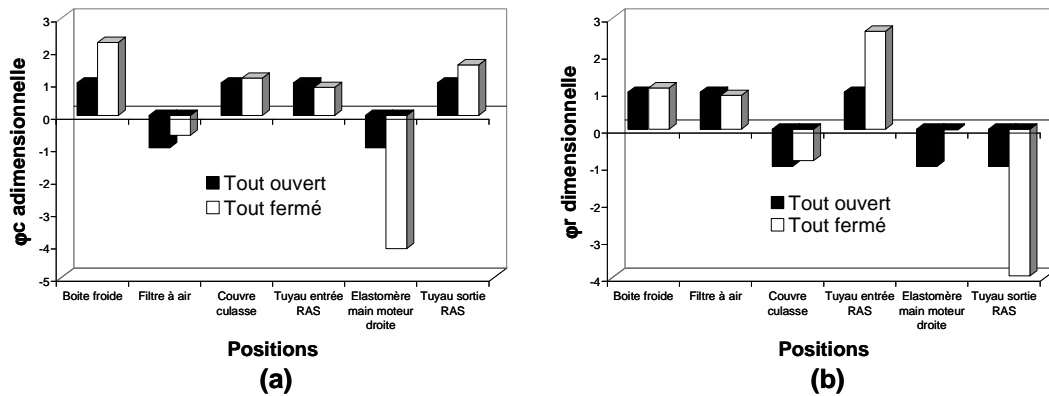


Figure 4 : Evolutions au niveau des différents organes de la densité de flux : (a) convectif (b) radiatif ; pour les deux configurations tout ouvert et tout fermé en coup de chaud.

Nous observons (Figure 4-a) pour la majorité des positions testées que la fermeture des fuites augmente la densité de flux convectif absorbée à la surface et diminue celle dissipée. En effet, en prenant la convention de signe positif pour un flux convectif absorbé, la densité de flux convectif s'écrit sous la forme :

$$\varphi_c = h.(T_f - T_p) \quad (1)$$

En fermant les zones de fuites, nous diminuons les coefficients de convection h_c du fait que les débits d'air diminuent et nous augmentons les températures de paroi T_p et d'air T_f . D'une façon générale, la température du fluide est plus sensible à la fermeture des fuites que celle de la paroi de l'organe et augmente ainsi plus rapidement que celle de la paroi. Donc en fermant les fuites, nous augmentons l'écart de température ($T_f - T_p$). De plus, cette augmentation d'écart de température domine sur la diminution du coefficient de convection et augmente de ce fait la densité de flux convectif absorbée. Le tableau 2 montre un exemple de ces tendances au niveau du tuyau de sortie RAS.

	T_p (°C)	T_f (°C)	$(T_f - T_p)$ (°C)	h ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	φ_c ($W.m^{-2}$)
Tout ouvert	85,1	89,4	4,3	33,56	144
Tout fermé	91,5	105,9	14,4	15,66	225

Tableau 2 : Evolutions avec la fermeture des fuites des paramètres au niveau du tuyau de sortie RAS.

Dans le cas de densité de flux convectif évacuée, les deux paramètres vont dans le même sens. Dans ce cas l'écart de température ($T_f - T_p$) est négatif, donc en fermant les fuites nous diminuons l'écart en valeur absolue. De plus, le coefficient de convection h_c diminue. Donc la densité de flux négative (évacuée) diminue en valeur absolue. Les évolutions des densités de flux radiatifs avec la fermeture des fuites ne présentent pas le comportement typique observé sur les flux convectifs. Ces évolutions dépendent de la position de l'organe et de la situation thermique de son entourage. En effet, la densité de flux radiatif échangée à la surface d'un organe s'écrit sous la forme :

$$\varphi_r = \sigma.\varepsilon.(T_r^4 - T_p^4) \quad (2)$$

où T_r est la température radiative moyenne de l'entourage de l'organe. Par définition, la température radiative moyenne d'un corps est la température d'un corps fictif avec lequel le corps considéré échange le même flux radiatif que celui qu'il échange avec l'ensemble des corps entourant. D'après l'équation (2), on voit bien que l'évolution de la densité de flux radiatif avec la fermeture des fuites ne peut pas être prédite et dépend du taux d'augmentation des deux températures T_p et T_r . Considérons par exemple le cas de la boîte froide (Figure 4-b). Nous observons qu'en fermant les fuites, la densité de flux radiative absorbée augmente. Ceci est dû au fait que l'entourage de la boîte froide est plus chaud qu'elle-même ($T_r > T_p$) et qu'il augmente en température plus rapidement ($(T_r^4 - T_p^4)$ augmente en fermant les fuites). Bien que les évolutions des densités de flux radiatifs soient non imprédictibles, pour la plupart des organes du diagramme de la Figure 4-b, nous observons qu'en fermant les fuites la densité de flux radiatif absorbée augmente et celle évacuée diminue en valeur absolue (sauf quelques exceptions). Finalement, en bouchant les fuites nous augmentons les densités de flux convectifs et radiatifs absorbés (positives) et nous diminuons en valeurs absolues ces mêmes densités quand elles sont évacuées (négatives). Ceci explique bien les évolutions des densités de flux globaux de la Figure 4-b et ainsi les augmentations de températures due à la fermeture des fuites de la Figure 4-a.

4- Conclusions

Les deux modes de transferts de chaleur par convection et par rayonnement interviennent simultanément dans la plupart des applications, particulièrement dans les applications automobiles. Nous avons vu que la mesure séparée de la contribution de chacun d'eux dans le flux global est un axe principal dans la compréhension physique de la thermique du compartiment moteur.

Les zones de fuites du compartiment moteur d'un véhicule diminuent les températures de ce dernier aussi bien en roulage qu'en coup de chaud. Ces diminutions sont plus sensibles en coup de chaud qu'en roulage et sont d'ordres différents pour les différentes parties du sous-capot. Pour la partie haute du sous-capot, les effets des fuites sur les températures deviennent négligeables.

En fermant les zones de fuites en coup de chaud, les deux modes de transferts de chaleur convectifs et radiatifs sont défavorisés. Nous avons vu une augmentation des densités de flux positives et une diminution en valeur absolue des densités négatives. Ces évolutions dans un même sens de ces deux densités qui composent la densité de flux global la défavorisent. Cela induit des augmentations de températures dans la région du sous-capot.

Références

- [1] M.Khaled, F.Harambat, H.Peerhossaini, Gestion aérothermique des zones de fuites du compartiment moteur d'un véhicule automobile, *Proc. Soc. Fra. Therm.* (Toulouse, 3-6 Juin 2008).
- [2] M.Khaled, F.Harambat, H.Peerhossaini, Effects of car inclination on air flow and aerothermal behavior in the underhood compartment, *Proc. Flu. Eng. Div. Sum. Conf.* (Jacksonville .FL.USA, 10-14 Août 2008).
- [3] M.Khaled, F.Harambat, H.Peerhossaini, A quantitative method for assessment of car inclination effects on thermal management of the underhood compartment, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, (Soumis 07 Novembre 2008).