

Développement d'une méthode de détection de la transition laminaire/turbulent par caméra infrarouge sur un véhicule ultra-profilé

Ing. E. LABERGERE
ECAM-Bruxelles

La méthode développée dans ce travail a pour but de détecter la position de la transition à l'aide d'une caméra infrarouge, par calcul, ou de l'estimer par simple visualisation des images. Elle permet d'une part de voir l'influence qu'ont les modifications apportées au véhicule sur la position de la transition, et d'autre part de comparer les résultats expérimentaux aux résolutions numériques et d'ainsi valider ces codes CFD (computational Fluid Dynamics).

Mots-clefs : Détection, transition, caméra infrarouge.

The method developed in this work allows to detect the position of the transition using an infrared camera, by calculation, or estimating it by simple images viewing. On the one hand, it allows to see the influences that modifications made on the vehicle have on the transition's position. On the other hand it allows to compare experimental results with numerical resolutions and thus validate the CFD codes (Computational Fluid Dynamics).

Keywords: Detection, transition, infrared camera.

1. Introduction

Le passage d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent dans la couche limite peut avoir des conséquences néfastes sur l'aérodynamique des véhicules, comme par exemple une augmentation de la traînée de frottement, ce qui en diminue considérablement les performances.

Dans un processus d'optimisation des performances aérodynamiques d'un véhicule, il est intéressant d'avoir à disposition une méthode de détection de la transition, afin de voir l'influence qu'ont les modifications apportées au véhicule sur la position de la transition.

Il n'existe que très peu de méthodes permettant la détection de cette transition, et celles existantes nécessitent du matériel de pointe ou ne sont pas très précises.

Ce travail a pour but de développer une méthode de détection de la transition laminaire/turbulent par caméra infrarouge sur un véhicule ultra-profilé.

Cette méthode se base sur le fait que le transfert de chaleur entre une maquette préalablement refroidie, placée dans un écoulement, et le fluide est plus important lorsque l'écoulement dans la couche limite est turbulent que lorsqu'il est laminaire.

La caméra infrarouge permet d'effectuer des acquisitions de températures en surface de la maquette en fonction du temps. Il va donc être possible de calculer les coefficients de transfert thermique en différents endroits de la surface, à partir de modèles décrivant l'évolution théorique des températures lors du réchauffement et ainsi en déduire la position de la transition laminaire/turbulent.

Dans une première partie vont être exposées des notions théoriques de mécanique des fluides nécessaires à la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur et de transition dans la couche limite.

La deuxième partie est axée sur le principe de détection de la transition et la méthode d'analyse des résultats.

Les deux parties suivantes sont une présentation et une interprétation d'une série d'expériences réalisées.

Dans un premier temps, des expériences ont été faites sur un modèle dont la transition est bien connue, à savoir une plaque plane. Cette plaque a été placée dans une petite soufflerie et observée à la caméra infrarouge, afin de déterminer la position de cette transition à différentes vitesses, et ces résultats ont été comparés à la théorie.

Dans un second temps, les expériences ont été réalisées sur une maquette à l'échelle 1/3 d'une voiture solaire ultra-profilée. La maquette a été placée cette fois-ci dans une soufflerie subsonique permettant d'atteindre des vitesses allant jusqu'à 60 m/s. La démarche est la même que dans le cas de la plaque plane, c'est-à-dire observation à la caméra infrarouge pour différentes vitesses de la soufflerie et analyse des résultats à l'aide d'un modèle théorique qui doit permettre d'estimer la position de la transition.

2. Objectifs

Les objectifs de ce travail sont de développer une méthode qui permet de déterminer la position de la transition laminaire/turbulent sur un véhicule placé en soufflerie à l'aide d'une caméra infrarouge et d'étudier le déplacement de cette zone de transition pour différentes vitesses de la soufflerie.

3. Le véhicule ultra-profilé

3.1 Traînée sur les objets

La traînée est une force aérodynamique constituant une résistance au mouvement. Les performances aérodynamiques d'un véhicule vont donc dépendre notamment de la traînée engendrée par celui-ci. Plus elle sera importante, moins les performances aérodynamiques du véhicule seront bonnes.

La traînée totale se décompose en trois parties :

- Une traînée de forme, qui, comme son nom l'indique, va dépendre des formes du véhicule.
- Une traînée de frottement, qui va dépendre du type d'écoulement (laminaire ou turbulent) et de la position de la transition laminaire/turbulent.
- Une traînée induite : il n'y a pas de traînée induite s'il n'y a pas de portance.

Dans le cas d'un véhicule il n'y a pas de portance, donc pas de traînée induite.

La comparaison des proportions entre traînée de forme et traînée de frottement pour une sphère et pour une forme ultra-profilée permet de mieux comprendre la signification de ces deux composantes de la traînée :

- Sphère : 
- Forme ultra-profilée : 

Pour la sphère une grande partie de la traînée totale est due à la composante de traînée de forme, tandis que sur la forme ultra-profilée, la traînée de forme est négligeable par rapport à la traînée de frottement.

Sur un véhicule ultra-profilé, on peut donc négliger la traînée de forme ainsi que la traînée induite, car il n'y a pas de portance.

3.2 Maquette de la voiture solaire

Le véhicule ultra-profilé pour lequel il va falloir développer une méthode de détection de la transition laminaire/turbulent est une maquette à l'échelle 1/3 de la dernière voiture solaire (photographie 1) réalisée par UMICORE SOLAR TEAM, équipe de jeunes étudiants et ingénieurs participant notamment au PANASONIC WORLD SOLAR CHALLENGE.



*Photographie 1: voiture solaire (à gauche),
maquette à l'échelle 1/3 (à droite)*

4. Intérêt de la détection de la transition sur un véhicule

La Figure 1 décrit l'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de Reynolds sur une plaque plane.

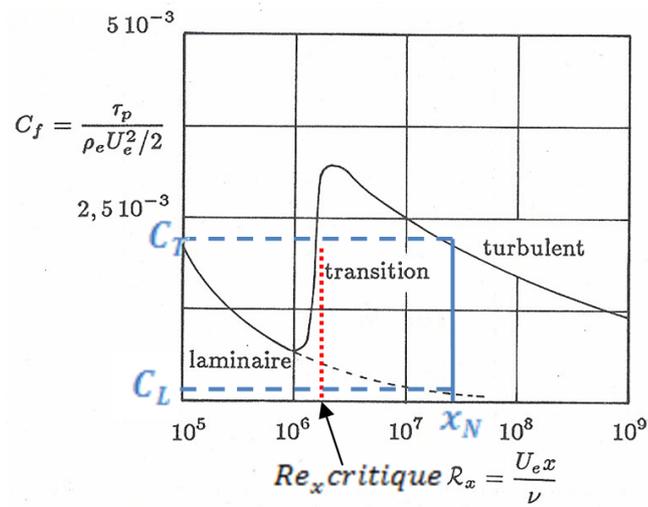


Figure 1: évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de Re_x

Il faut tout d'abord définir le nombre de Reynolds x :

$$Re_x = \frac{U_e * x}{\nu}$$

- U_e : vitesse de l'écoulement général (non perturbé) $\left[\frac{m}{s}\right]$
- ν : viscosité cinématique du fluide $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
- x : distance au bord d'attaque de la plaque plane $[m]$

Le nombre de Reynolds x caractérise le régime d'écoulement en présence dans la couche limite. Lorsque la distance x au bord d'attaque augmente, le nombre de Reynolds x va augmenter et pour une valeur dite critique, la

transition laminaire/turbulent apparaît. Pour un objet donné, cette transition intervient toujours pour un même nombre de Reynolds critique (Figure 1 droite verticale en pointillé).

Tout d'abord, à faible distance du bord d'attaque, la couche limite est laminaire. Puis, lorsque la distance au bord d'attaque augmente, le passage au régime turbulent engendre une augmentation importante du coefficient de frottement qui va ensuite diminuer, après la zone de transition, en s'éloignant du bord d'attaque.

Cette figure permet de constater que, pour une valeur de x_N donnée (au-delà de la zone de transition), le coefficient de frottement est bien plus élevé dans la couche limite turbulente (il vaut C_T) qu'il ne le serait si la couche limite restait laminaire (il vaudrait C_L).

Le passage au régime turbulent est donc néfaste puisqu'il a tendance à augmenter la traînée de frottement et donc à altérer les performances aérodynamiques d'un véhicule. De plus, plus le passage à l'écoulement turbulent intervient tôt sur le véhicule (faibles valeurs de x), et plus la traînée de frottement sera importante.

Comme expliqué précédemment (cf. §3.1), sur un véhicule ultra-profilé, la traînée de forme est négligeable par rapport à la traînée de frottement.

Donc pour optimiser les performances d'un tel véhicule, il faut repousser la transition le plus loin possible (fortes valeurs de x) pour diminuer au maximum cette traînée de frottement (\approx traînée totale).

Il est donc intéressant d'avoir à disposition une méthode de détection de la transition d'une part pour voir l'influence qu'ont les modifications effectuées sur le véhicule sur la position de la transition, d'autre part pour valider les codes numériques.

En effet il sera possible de comparer les résultats obtenus par des études CFD (Computational Fluid Dynamics : étude de la dynamique des fluides par résolution numérique) aux résultats obtenus par cette méthode de détection de la transition et ainsi valider ces codes numériques.

5. Méthode de détection de la transition

Le principe général de cette méthode de détection se base sur une analogie thermique.

L'évolution du coefficient de transfert de chaleur est identique à l'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de Reynolds comme on peut le voir sur la Figure 2.

Le coefficient de transfert de chaleur (h) est plus important dans une couche limite turbulente que dans une couche limite laminaire.

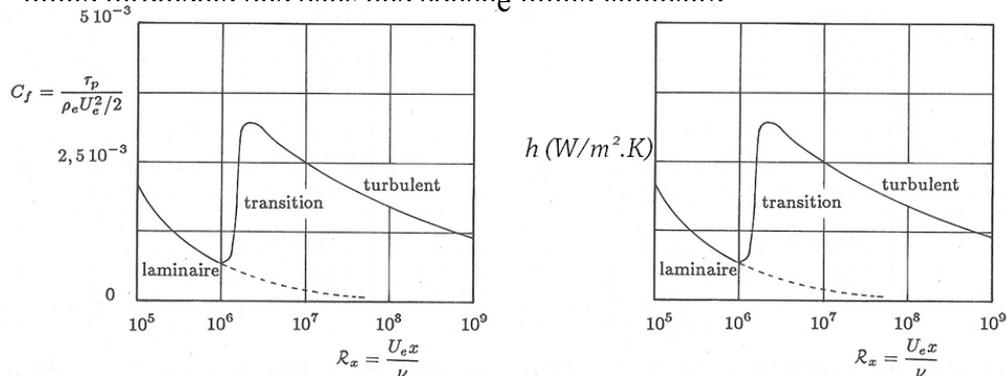


Figure 2: évolution du coefficient de frottement (à gauche) et du coefficient de convection (à droite) en fonction du Reynolds x .

C'est donc en calculant ce coefficient de transfert en différents endroits d'une maquette placée dans un écoulement, qu'il devrait être possible de déterminer la position de la zone de transition dans la couche limite.

6. Expériences

6.1 Détermination de la transition laminaire/turbulent sur une plaque plane

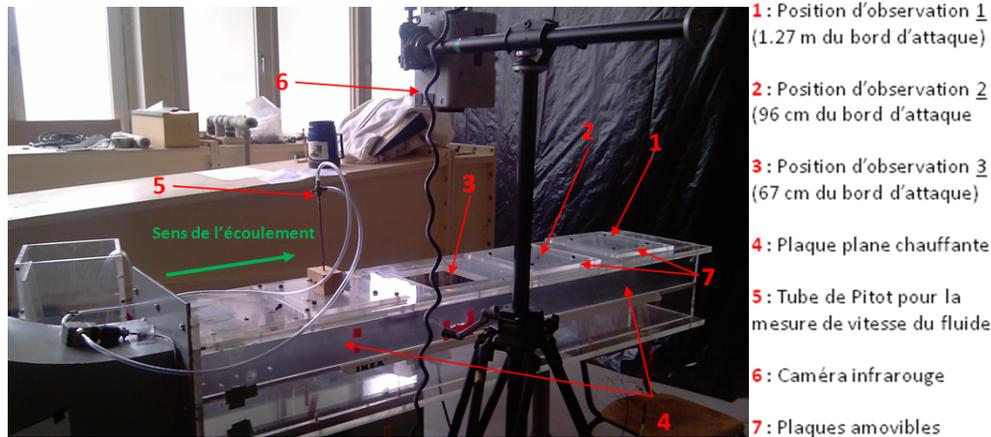


Figure 3: installation pour l'expérience sur la plaque plane

Il est intéressant d'utiliser la caméra infrarouge pour tenter de déterminer la transition laminaire/turbulent sur une plaque plane, avant de pouvoir développer une méthode de détection de la transition sur un véhicule ultra-profilé. De nombreuses études ont été faites sur la transition sur une plaque plane, ce qui va permettre de comparer les résultats obtenus lors de cette expérience aux modèles théoriques existants.

Cette expérience consiste à placer une plaque plane, munie d'une résistance chauffante, dans une section rectangulaire en plexiglas d'une petite soufflerie, à faire chauffer la plaque à une puissance de chauffe connue et à observer la plaque avec la caméra infrarouge en différents endroits et pour différentes vitesses de la soufflerie, lorsque l'équilibre des températures est atteint.

A partir des températures relevées en surface de la plaque plane à l'aide de la caméra infrarouge, il a été possible de calculer les coefficients de transfert de chaleur aux différentes positions d'observation à partir de la formule suivante :

$$\dot{Q} = h * S * (T_{surf} - T_{air}) \rightarrow h = \frac{\dot{Q}}{S * (T_{surf} - T_{air})}$$

- h : coefficient de transfert de chaleur par convection $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
- T_{surf} : température en surface du modèle $[K]$
- $T_{air} = 22.5^\circ C$: température de l'air $[K]$
- S : surface supérieure de la plaque $[m^2]$
- \dot{Q} : flux de chaleur s'échappant par le dessus de la plaque plane $[W]$

Pour calculer le flux de chaleur s'échappant par le dessus de la plaque plane, il suffit de faire l'hypothèse que la moitié du flux s'échappe par le dessus de la plaque et que l'autre moitié s'échappe par le dessous. Comme la puissance de chauffe est connue, le flux s'échappant par le dessus de la plaque vaut donc la moitié de la puissance de chauffe.

Il est alors possible de calculer les coefficients de transfert de chaleur aux différentes positions d'observation et pour les différentes vitesses de la soufflerie.

Le tableau 1 reprend les coefficients de transfert de chaleur calculés.

	Test 1 : 5.1 m/s	Test 2 : 8 m/s	Test 3 : 10.8 m/s	Test 4 : 13.26 m/s
h position 1 $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$	16.81	22.58	28.8	33.38
h position 2 $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$	17.72	24.68	30.71	35.44
h position 3 $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$	19.19	26.78	32.9	37.76

Tableau 1: coefficients de transfert de chaleur pour les différents essais

Pour qu'il y ait transition laminaire/turbulent, il faudrait observer une augmentation du coefficient h entre deux positions en s'éloignant du bord d'attaque de la plaque plane. Or les résultats montrent pour tous les essais une diminution du h en s'éloignant du bord d'attaque. Cela signifie que la transition se situe soit en amont de la position 3 (qui est la plus proche du bord d'attaque) soit en aval de la position 1 (qui est la plus éloignée).

Il faut donc déterminer si nous sommes en présence d'un écoulement laminaire ou turbulent.

Il existe des formules donnant l'évolution théorique des coefficients de transfert de chaleur en fonction de la distance au bord d'attaque dans un écoulement laminaire et dans un écoulement turbulent.

En comparant pour chaque essai les évolutions théoriques et l'évolution mesurée, il devrait être possible de déterminer le régime d'écoulement. Voici la comparaison pour les deux vitesses extrêmes, à savoir 5,1 et 13,26 m/s :

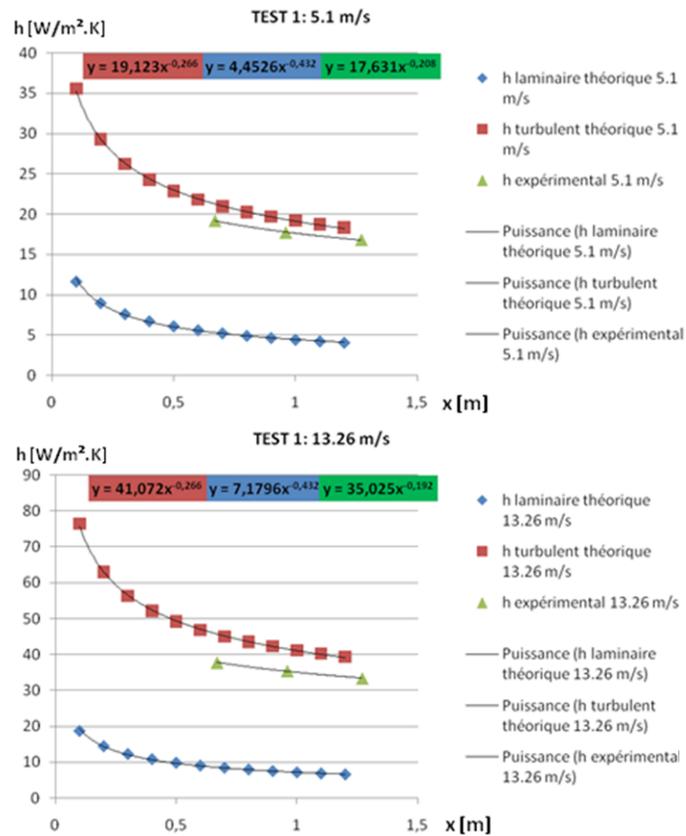


Figure 4: évolutions théoriques et expérimentales pour les tests 1 et 4

On voit clairement que les évolutions mesurées correspondent, dans chacun des essais, aux évolutions théoriques pour un écoulement turbulent.

Ce qui signifie pour chacun des essais, que l'écoulement est turbulent quelle que soit la position d'observation.

En théorie, pour les vitesses utilisées, la transition aurait dû être visible sur la plaque plane. Par exemple pour l'essai à 5,1 m/s, la théorie donne une transition laminaire/turbulent située à environ 1,5 mètre.

On devrait donc être proche de l'évolution théorique du coefficient de transfert de chaleur dans un écoulement laminaire plutôt que turbulent comme c'est le cas.

Une mesure de l'intensité de turbulence dans la soufflerie a été réalisée : cette intensité était d'environ 20 % explique pourquoi il n'a pas été possible d'observer la transition.

Néanmoins ces expériences ont permis de montrer qu'à l'aide de la caméra infrarouge, par analogie thermique, il est possible de détecter le régime d'écoulement à partir des coefficients de transfert de chaleur.

7. Détermination de la transition laminaire/turbulent sur un véhicule ultra-profilé

7.1 Présentation de l'expérience



Photographie 2: méthode de refroidissement de la maquette

Pour déterminer la transition laminaire/turbulent sur la maquette de la voiture solaire, on va la placer dans la soufflerie, la refroidir grâce à un plateau de carboglace placé sous cette maquette et la recouvrir d'une boîte isolante pour limiter les pertes au maximum. On doit en effet obtenir une différence de température entre la maquette et le fluide, pour qu'il y ait transfert de chaleur.

Dès que la température de la maquette atteint environ 0°C , on enlève la boîte isolante ainsi que la carboglace.

On démarre la soufflerie à la vitesse souhaitée et on relève les évolutions de la température en surface de la maquette lors du réchauffement, à l'aide de la caméra infrarouge (que l'on peut voir sur la photographie 2), ainsi que l'évolution de la température de l'air.

Il existe différents modèles théoriques décrivant le processus de réchauffement, mais celui correspondant le mieux à la maquette utilisée est le suivant:

$$\frac{T - T_{air}}{T_i - T_{air}} = e^{-hA_s t / \rho V c}$$

- T : Température de la surface de la maquette au temps t [K]
- T_{air} : Température de l'air ambiant [K]
- T_i : température initiale de la surface de la maquette au temps $t=0$ [K]
- h : coefficient de transfert thermique $\left[\frac{W}{m^2.K}\right]$
- A_s : Surface d'échange [m^2]
- ρ : masse volumique de la maquette $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- V : Volume de la maquette [m^3]
- c : capacité thermique massique de la maquette $\left[\frac{J}{kg.K}\right]$
- t : temps [secondes]

A partir de cette équation et des températures relevées lors du réchauffement, il est possible de calculer les coefficients de transfert de chaleur.

Mais il faut une expérience de référence pour connaître le rapport entre le coefficient de transfert de chaleur dans un écoulement laminaire et dans un écoulement turbulent pour pouvoir détecter la transition.

Le calcul de ce rapport a été fait dans l'expérience de référence suivante.

7.2 Expérience de référence

Un fil est placé à l'avant de la maquette sur 1/3 de sa largeur pour provoquer la transition et ainsi être certain d'être en présence d'un écoulement turbulent après l'obstacle.

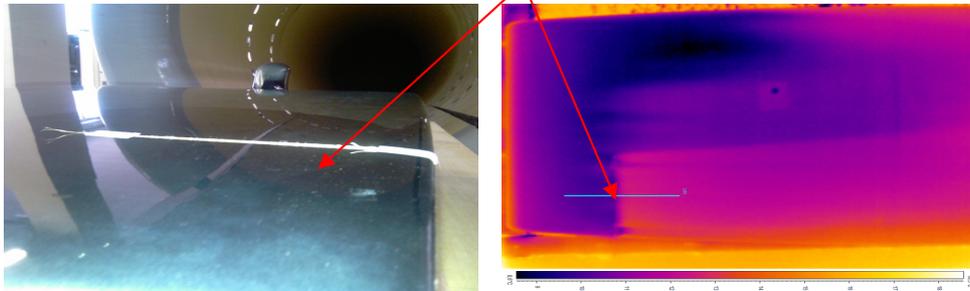
On refroidit la maquette de la même manière que précédemment avec de la carboglace, on démarre la soufflerie à 40 m/s, et on fait une acquisition des

températures en surface de la maquette avec la caméra infrarouge lors du réchauffement. Une acquisition sur la température de l'air est aussi faite avec un thermocouple. L'image de la caméra infrarouge est celle où la soufflerie avait atteint la vitesse souhaitée.

En regardant le profil de température le long de la ligne tracée en clair sur l'image de la caméra infrarouge, on voit bien le saut en température. La température après l'obstacle est plus importante, en raison du passage à un écoulement turbulent.

Il faut maintenant calculer le rapport entre le coefficient de transfert avant l'obstacle et après l'obstacle.

Obstacle : fil



*Photographie 3: emplacement de l'obstacle (à gauche),
vue du dessus par caméra infrarouge (à droite)*

A partir des données relevées, il est possible de calculer à l'aide de Matlab la valeur du rapport entre les coefficients de transfert de chaleur de la partie turbulente (partie claire à droite de l'obstacle sur la photographie 3) à la partie laminaire (partie sombre à gauche de l'obstacle sur la photographie 3). On importe les images de la caméra infrarouge prise lors du réchauffement de la maquette dans MATLAB, et à partir du modèle théorique décrivant le processus de réchauffement on va calculer les coefficients de transfert de chaleur en différents endroits de la maquette.

Les calculs donnent le résultat suivant :

$$\frac{h_T}{h_L} = 1.314$$

Maintenant que le rapport de référence est connu, il est possible, à partir des images de la caméra infrarouge, de calculer les coefficients de transfert de chaleur dans les zones supposées laminaires et dans celles supposées turbulentes, et en comparant le rapport de ces coefficients à celui de

référence, nous pouvons localiser le lieu de la transition entre les deux types d'écoulements.

7.3 Détection de la transition à différentes vitesses

Des expériences ont été réalisées à 28, 32.5, 40 et 45 m/s

Le véhicule solaire ayant une vitesse de croisière de 100 km/h (27,8 m/s), les vitesses auxquelles les essais ont été réalisés peuvent paraître trop importantes. Mais il faut se rappeler que les expériences sont faites sur une maquette à l'échelle 1/3 du véhicule solaire.

La formule du nombre de Reynolds permet de comprendre l'influence de l'échelle de la maquette sur les vitesses de la soufflerie :

$$Re = \frac{vL}{\nu}$$

- v : vitesse du fluide $\left[\frac{m}{s}\right]$
- L : dimension caractéristique de la maquette $[m]$
- μ : viscosité dynamique du fluide $[Pa.s]$

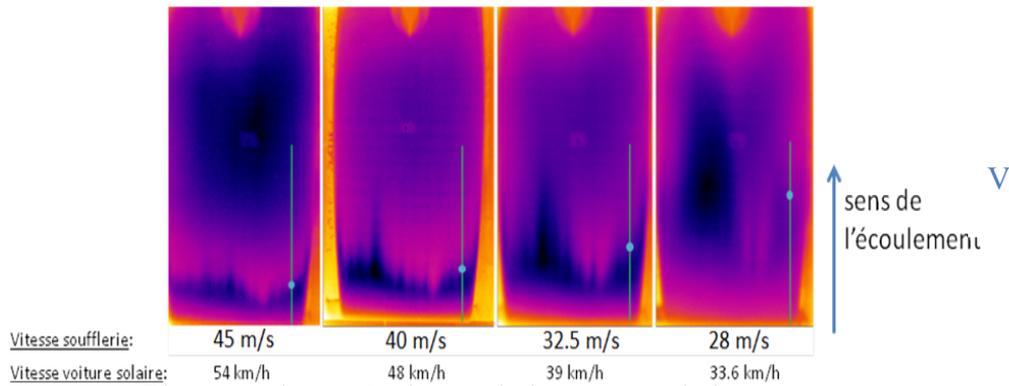
Pour que l'étude de la transition sur la maquette à l'échelle 1/3 donne les mêmes résultats que si elle avait été réalisée sur la voiture solaire à l'échelle 1, il faut que le nombre de Reynolds reste identique.

Or comme la dimension caractéristique est divisée par 3 puisque la maquette est à l'échelle 1/3, pour garder la même valeur du nombre de Reynolds il faut travailler à une vitesse trois fois supérieure étant donné que le fluide est inchangé.

Une vitesse de 45 m/s pour la soufflerie correspond à une vitesse de 54 km/h (15 m/s) pour la voiture solaire. On est donc dans le domaine d'utilisation de la voiture (il aurait même été possible de travailler avec des vitesses supérieures).

Pour ces essais, la méthodologie est encore la même : on refroidit la maquette aux environs de 0 degré, on démarre la soufflerie à 28, 32, 40 ou 45 m/s suivant les essais et on relève l'évolution des températures en surface de la maquette lors du réchauffement à l'aide de la caméra infrarouge.

Ces 4 images de la photographie 4 sont celles relevées par la caméra lorsque la vitesse souhaitée pour la soufflerie à été atteinte.



Photographie 4: évolution de la position de la transition en fonction de la vitesse de la soufflerie

La première chose à faire est de détecter, sur les images de la caméra, les zones supposées laminaires et supposées turbulentes, dans lesquelles il faut calculer les coefficients de transfert et comparer les rapports avec le rapport de référence.

Les zones supposées laminaires sont les zones sombres sur les images puisque la température est plus faible que dans les zones claires, et on devrait donc avoir un coefficient de transfert de chaleur aussi plus faible.

Les rapports calculés sont repris dans le tableau 2 :

	h_L	h_T	$\frac{h_T}{h_L}$
Expérience de référence 40 m/s	/	/	1.314
Essai à 28 m/s	(17)	(21)	1.235
Essai à 32.5 m/s	(19)	(24)	1.263
Essai à 40 m/s	(22)	(29)	1.318
Essai à 45 m/s	(25)	(36)	1.44

Tableau 2: récapitulatif des rapports entre les coefficients de transfert zones supposées laminaire et supposées turbulente

On voit qu'ils sont très proches du rapport de référence : on devrait donc être en présence d'une transition laminaire/turbulent.

Mais il faut encore vérifier l'évolution de la position de la transition en fonction de la vitesse.

On peut la vérifier à l'aide de la formule du nombre de Reynolds x :

$$Re_{x\text{ critique}} = \frac{V * x_{\text{critique}}}{\nu}$$

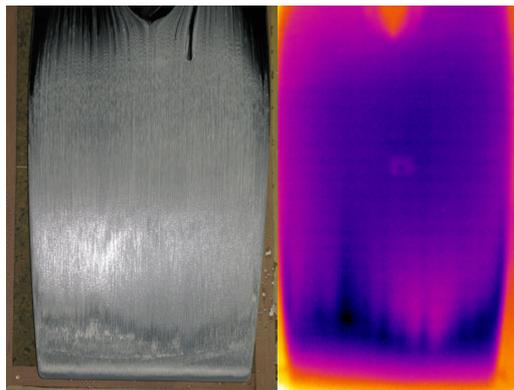
Sur un objet ou une maquette, la transition intervient toujours pour un même nombre de Reynolds x critique et comme la viscosité du fluide est constante, on voit que pour une augmentation de vitesse la transition doit se rapprocher du bord d'attaque.

C'est bien ce qu'on observe le long des droites claires sur les images de la caméra infrarouge.

Il reste encore un phénomène à identifier, la transition n'est pas à la même distance du bord d'attaque sur toute la largeur.

Pour vérifier si cette différence de position sur la largeur de la maquette est due au type d'écoulement laminaire ou turbulent et si l'on est bien en présence d'une transition, ou due à une inhomogénéité dans le matériau (qui provoquerait une variation du coefficient de transfert de chaleur), un essai de visualisation à l'huile a été fait.

On étale une couche d'huile sur la maquette, on démarre la soufflerie pendant quelques minutes et on observe la façon dont l'huile s'est répandue.



Photographie 5: comparaisons des visualisations à l'huile et par caméra infrarouge

En comparant la visualisation à l'huile et par caméra infrarouge pour une même vitesse de la soufflerie, on observe la même répartition sur les deux types de visualisation.

Etant donné que la visualisation à l'huile ne dépend pas de propriétés du matériau mais uniquement de l'écoulement, nous sommes bien en présence d'une transition laminaire/turbulent.

8. Conclusion

Les différentes expériences menées ont montré que la détection de la transition laminaire/turbulent par analogie thermique et utilisation d'une caméra infrarouge était réalisable.

Cette méthode a permis d'une part de trouver la position de la transition en calculant les rapports entre les coefficients de transfert de chaleur dans les zones présumées laminaires et les zones présumées turbulentes puis en comparant ceux-ci au rapport calculé lors de l'expérience de référence.

Elle a permis d'autre part, d'estimer la position de la transition très rapidement, par simple visualisation des images prises par la caméra infrarouge.

Cette méthode de détection sur un véhicule ultra-profilé a l'avantage d'être une méthode de mesure non intrusive, qui ne perturbe pas l'écoulement et donc la position de la transition.

De plus la méthode développée dans ce travail peut être utilisée sur n'importe quel véhicule, même sans connaître les propriétés du matériau constitutif du véhicule, ce qui est un avantage considérable. Cependant, il faut que la surface du véhicule présente une émissivité importante et que le matériau soit homogène pour que la mesure de température à l'aide de la caméra infrarouge ne soit pas faussée.

Ce travail a mis en évidence l'importance d'une bonne méthodologie expérimentale et d'analyse :

- Lors de l'expérimentation, c'est l'étape de refroidissement de la maquette qui est très importante car il faut avoir une température la plus uniforme possible en début d'expérience dans toute la maquette. La non-uniformité des températures au départ fait apparaître lors de la visualisation à la caméra

infrarouge des différences de températures sur la maquette, qui ne sont pas dues à une transition laminaire/turbulent et donc compliquent, voire même empêchent la visualisation de celle-ci.

- Lors de l'analyse des résultats, le point important pour la détection est le choix du modèle théorique décrivant l'évolution des températures à la surface de la maquette. En effet c'est à partir de ce modèle que les coefficients de transfert de chaleur permettant de détecter la transition sont calculés. Une erreur sur le choix de celui-ci entraîne des valeurs des coefficients de transfert fausses et donc une mauvaise détection de la transition.

La maquette de la voiture solaire utilisée présentait une épaisseur variable mais pas de façon très importante ce qui n'a pas affecté les résultats.

Dans le futur, pour l'analyse de nouveaux modèles, il faudra s'assurer que l'épaisseur de ceux-ci ne varie pas trop, ou bien utiliser un modèle théorique différent pour chaque épaisseur du véhicule.

Bien que complexe à mettre en œuvre et ayant des limitations, cette méthode a permis ici de détecter la transition, détection importante dans le cadre d'un processus d'optimisation des performances aérodynamiques d'un véhicule et pour la validation des codes numériques (CFD).

9. Sources

- [1] ARTS, T. et al. *Measurement techniques in fluid dynamics*. Rhode-Saint-Genève: The von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1994.
- [2] BEJAN Adrian & ALLAN D. Kraus, *Heat transfert handbook*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [3] BUCHLIN J.-M., *Phénomènes de transport*. Rhode-Saint-Genève: Institut von Karman de Dynamique des Fluides.
- [4] CLAESSENS A., *Transition detection on ultra-streamlined body using IR thermography*. Rhode-Saint-Genève: The von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2009.
- [5] COUSTEIX J., *Couche limite laminaire*. Toulouse: CEPADUES-Editions, 1988.
- [6] COUSTEIX J., *Turbulence et couche limite*. Toulouse: CEPADUES-Editions, 1989.
- [7] SCHLICHTING H., & GERSTEN K., *Boundary Layer Theory*. Allemagne: Springer, 2000.
- [8] VAN DEN DOOREN X., *Mécanique des fluides et transfert de chaleur*. Bruxelles: ECAM, 2007.
- [9] *3-Meter Diameter Wind Tunnel L-1A*. The von Karman Institute for Fluid Dynamics: http://www.vki.ac.be/index.php?option=com_content&view=article&id=57:3-meter-diameter-wind-tunnel-l-1a&catid=48:low-speed-wind-tunnels&Itemid=151
- [10] *Environmental and applied fluid dynamics dept*. The Von Karman Institute for Fluid Dynamics: http://www.vki.ac.be/index.php?option=com_content&view=section&id=7&Itemid=68
- [11] *History of the VKI*. The Von Karman Institute for Fluid Dynamics: <http://www.vki.ac.be/index.php?>

option=com_content&view=article&id=135:history-of-the-
vki&catid=81:history&Itemid=266

- [12] *Materials for prototype manufacturing*. Materialise:
http://www.materialise.com/prototyping-materials#ppt_3126854
- [13] UMICORE SOLAR TEAM: <http://www.solarteam.be>
- [14] *L'aérodynamique et l'origine des trainées parasites*.
<http://www.bls.fr/amatech/aerotechnique/trainees2/trai2iva.htm>