

MESURE DE LA PRESSION PARIETALE A L'AIDE DE PEINTURES SENSIBLES A LA PRESSION

Y. LE SANT, M-C. MERIENNE

*Onera, Département d'Aérodynamique Fondamentale et Expérimentale
Onera, BP 72, 92322 Châtillon Cedex, France
tél : 01.46.23.51.46
e-mail : merienne@onera.fr, lesant@onera.fr*

Résumé

La mesure de la pression en soufflerie aérodynamique s'effectuait exclusivement à l'aide de prises de pression jusqu'à très récemment. Une nouvelle méthode de mesure optique a été introduite qui est en voie de supplanter l'équipement classique, au moins pour les souffleries transsoniques. L'acronyme de cette technique est PSP, pour Peintures Sensibles à la Pression. Il s'agit d'une méthode optique qui fournit une image en pression sur la surface de la maquette. L'engouement dont elle fait l'objet se justifie par les gains considérables en coûts et temps d'équipement des maquettes. La richesse d'information inhérente aux images en fait un outil d'investigation de choix pour les écoulements complexes.

Les aspects fondamentaux de la PSP ainsi que les conditions d'utilisation sont présentés. La méthode est relativement simple à mettre en œuvre; par contre elle nécessite beaucoup de précautions si une grande précision est recherchée. Les aspects logiciels sont importants pour cette méthode, en particulier si les essais sont réalisés dans un contexte industriel. Un exemple d'application en basse vitesse est présenté afin d'illustrer les différents éléments d'un système PSP.

1. Introduction

Les essais en souffleries aérodynamiques sont réalisés afin de satisfaire à plusieurs objectifs. En soufflerie industrielle, il s'agit généralement de contrôler et de compléter la connaissance des performances attendues d'une maquette telle que celle d'un avion commercial. En soufflerie de taille moyenne et en soufflerie de recherche, les objectifs sont plus souvent la construction de bases de données destinées à la validation de codes de calcul. Enfin, un dernier objectif est la recherche exploratoire sur des concepts nouveaux ou des configurations innovantes.

Les mesures sont le fondement des essais en soufflerie. Le terme mesure est à prendre au sens large puisqu'il peut s'agir aussi bien de mesures fines à l'aide d'appareils complexes, que de simples observations visuelles permettant de statuer sur l'état de l'écoulement. L'ensemble des mesures aujourd'hui possibles est considérable et un choix doit être fait en fonction des ressources disponibles (temps, ressources humaines, ressources financières, ...). Néanmoins, la mesure de la pression pariétale sur les maquettes est une constante et rares sont les essais ne donnant pas lieu à des mesures de pression.

Jusqu'à très récemment, les mesures de pression étaient réalisées à l'aide de prises de pression. Ces prises doivent être reliées à des capteurs, ce qui complique la conception des maquettes et en augmente le coût, tout comme les délais de fabrication. A titre d'exemple, la réalisation d'une maquette destinée à être testée dans une grande soufflerie industrielle comporte plusieurs

centaines de prises de pression. Le coût de l'équipement intervient pour moitié dans le coût total et sa réalisation nécessite plusieurs mois de travail.

La mesure de la pression par voie optique a donc été longtemps considérée comme un objectif majeur, bien qu'il soit resté longtemps utopique. C'est seulement il y a une dizaine d'années que des possibilités d'application réelles sont apparues avec l'émergence de la PSP [1,2,3]. PSP est l'acronyme français de Peintures Sensibles à la Pression. Il est conservé en anglais pour lequel il signifie Pressure Sensitive Paint. La PSP repose sur la sensibilité à l'oxygène de certaines molécules dont la luminescence est inhibée par l'oxygène. Le principe de la PSP est décrit dans la section 2.

Les revêtements PSP ne sont pas sensibles qu'à la pression : d'autres grandeurs, et en particulier la température, modifient leur réponse. Différentes méthodes d'exploitation, décrites dans la section 3, ont été développées pour compenser l'effet de ces sources d'erreur. La section 4 dresse un rapide panorama du développement de la PSP dans le monde. La section 5 décrit brièvement les peintures, matériels et logiciels utilisés dans les systèmes PSP. La peinture est bien évidemment la clef d'un système PSP, mais on verra dans cette même section que les aspects logiciels sont très importants. Ils constituent la partie la plus visible d'une application réelle en soufflerie comme cela est décrit au cours de l'exemple présenté dans la section 6.

La PSP est maintenant une méthode de mesure bien établie pour les mesures de pression pariétale en soufflerie transsonique. Des développements sont néanmoins nécessaires pour en augmenter la précision et pour en étendre le champ d'application, en particulier en instationnaire. Ces développements sont présentés dans la section 7.

L'objet de cette communication est de présenter les fondements de la PSP, l'état de l'art et ses conditions d'utilisation. Ceci exclut une étude détaillée de tous ses aspects, de même qu'on a cherché à limiter les références bibliographiques. Pour plus d'information, le lecteur intéressé se référera à deux excellentes publications récentes dues à J.Bell [4] et J.Sullivan [5] ainsi qu'au mémoire de thèse de Y.Mébariki [6], moins récent mais très complet sur les aspects fondamentaux de la PSP.

2. Principe de la PSP

2.1. Sensibilité de la luminescence à la pression

Pratiquement tous les matériaux existants sont luminescents, c'est-à-dire qu'ils émettent de la lumière quand ils sont excités à une certaine longueur d'onde. La longueur d'onde d'émission est toujours plus grande que la longueur d'onde d'excitation, selon la loi de Stokes. L'émission peut suivre immédiatement l'excitation, on parle alors de fluorescence, ou être différée dans le temps, ce qui est le phénomène de phosphorescence. L'intensité et le spectre d'émission dépendent de nombreux paramètres.

Pour les molécules utilisées dans les PSP, l'oxygène intervient en captant une partie de l'énergie de désexcitation, comme cela est indiqué sur la figure 1. Les molécules utilisées appartiennent à trois grandes familles : les porphyrines, les complexes de ruthénium et les dérivés du pyrène. Ces molécules sont excitées dans l'ultraviolet (pyrène) ou dans le visible (ruthénium). Certaines molécules (porphyrines) peuvent être excitées sur une large gamme couvrant l'ultraviolet et le visible. Dans tous les cas, l'émission s'effectue dans la partie visible du spectre.

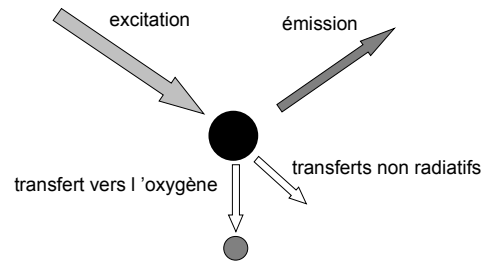


Figure 1 : principe de la sensibilité à la pression

La sensibilité à l'oxygène, plus couramment appelée "oxygen quenching", confère ainsi une sensibilité à la pression de l'air puisque la concentration de l'oxygène y est constante. Il ne s'agit donc pas d'une sensibilité à la pression au sens mécanique. Par ailleurs, il existe de nombreux mécanismes qui entrent en concurrence pour diminuer l'intensité de l'émission lumineuse. Ces transferts non radiatifs peuvent même être prépondérants. Une revue détaillée des phénomènes physiques et chimiques est présentée dans [6].

2.2. Composition d'un revêtement PSP

La composition typique d'un revêtement PSP est présentée sur la figure 2. Le matériau constitutif de la maquette est tout d'abord recouvert d'une couche écran qui a deux fonctions. La première est de cacher la luminescence naturelle du matériau maquette afin d'éviter un mélange avec le spectre d'émission du revêtement PSP. La deuxième fonctionnalité est d'augmenter l'intensité de l'émission en réfléchissant aussi bien le rayonnement d'excitation incident que l'émission propre de la PSP.

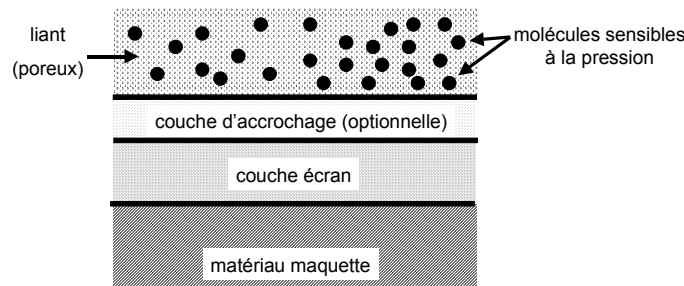


Figure 2: revêtement PSP

Selon les peintures, une couche d'accrochage peut être déposée sur la couche écran afin d'assurer une fixation correcte de la partie active. La couche active est constituée d'un liant poreux mélangé avec la molécule active. La porosité du liant est essentielle car le principe de la PSP repose sur des échanges avec l'oxygène. La pression partielle de l'oxygène dans la peinture n'est égale à la pression partielle de l'oxygène dans l'écoulement que si la porosité du liant est suffisante. Une première limitation de la PSP apparaît : la porosité de la peinture conditionne le temps de réponse de la PSP. Le temps de réponse des peintures usuelles est ainsi de l'ordre de la seconde.

Les revêtements PSP sont déposés avec un pistolet à peinture. Il faut veiller à protéger le personnel avec un matériel adéquat (masques, gants, tenues intégrales) car les solvants et produits PSP sont souvent toxiques. La maquette est en général peinte dans un local dédié, mais il est possible de peindre dans la veine d'essai en prenant soin de protéger les parois de la soufflerie comme sur la figure 3.



Figure 3: peinture en veine d'une maquette d'A340 par l'équipe PSP du DLR (dans la soufflerie LSWT de la DASA à Brème). Image fournie par le DLR.

2.3. Loi de Stern-Volmer

La sensibilité à la pression d'une PSP dépend de différents facteurs, dont les plus importants sont les constantes de temps des phénomènes concurrents de désactivation (voir [4,5,6]). On peut montrer que la sensibilité obéit sur un large domaine à la loi de Stern-Volmer :

$$\frac{I_{ref}}{I} = A + B \frac{p}{p_{ref}} \quad (1)$$

Dans cette équation, l'indice $_{ref}$ correspond à une valeur de référence, généralement prise à la pression ambiante. I_{ref} est l'intensité émise sous excitation continue à la pression de référence p_{ref} tandis que I est l'intensité émise sous excitation continue à la pression p .

La constante A donne le rapport des intensités entre la valeur au vide (c'est-à-dire en l'absence d'oxygène) et la valeur à la pression de référence (usuellement la pression ambiante). Comme l'oxygène capture une partie de l'énergie d'excitation, l'intensité de l'émission décroît d'autant plus que la pression partielle d'oxygène est élevée, c'est-à-dire que la pression est élevée. La constante A est donc toujours inférieure à 1. Elle est comprise généralement entre 0,3 et 0,5. Pour certains revêtements, comme ceux utilisant du pyrène pur, le rapport entre le vide et la pression ambiante est de 10, soit une valeur de 0,1 pour A . Enfin, il existe des revêtements possédant une très grande sensibilité ($A=0,01$) mais dont l'intérêt est limité autour de la pression ambiante car l'émission de la PSP y est très atténuée.

Le coefficient B dans l'équation de Stern-Volmer (1) donne la sensibilité à la pression autour de la pression ambiante (si $p_{ref}=1\text{bar}$). Comme I/I_{ref} vaut 1 à la pression ambiante, la somme $A+B$ vaut 1 et donc la valeur de B est toujours inférieure à 1. Toutefois, l'équation (1) n'est qu'approximative car elle ne prend pas en compte de nombreux effets, en particulier celui de la température. En pratique, on utilise des expressions polynomiales de la forme :

$$\frac{I_{ref}}{I}(T,p) = \sum_{i=0}^n A_i T^i + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^m B_{ij} T^i \frac{p^j}{p_{ref}^j} \quad (2)$$

La sensibilité à la pression autour de la pression ambiante peut parfois être supérieure à 1. Ce qui est surtout à noter dans cette équation (2) est l'apparition de la température dont l'effet est souvent important. De nombreuses PSP ont une sensibilité à la température de l'ordre de 1%/K. Pour une PSP sensible ($B \approx 1$), une augmentation non contrôlée de la température de 1K produit ainsi une erreur de 10mb autour de la pression ambiante, ce qui est considérable.

2.4. Durée de vie

Si on excite brièvement une molécule PSP, on peut montrer aisément que sa réponse est :

$$I(t) = I_{t=0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

où τ est la durée de vie de la luminescence. On montre que son expression est de la forme :

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 1 + \alpha p \quad (4)$$

où τ_0 est la durée de vie en l'absence d'oxygène, c'est-à-dire au vide. La durée de vie varie considérablement d'un composé à un autre : elle est de l'ordre de 100ns pour les composés à base de pyrène et de l'ordre de 100 μ s pour les porphyrines.

On obtient la réponse sous excitation continue en intégrant l'équation (3):

$$I = I_{t=0} \int_0^{\eta} e^{-\frac{\eta}{\tau}} d\eta = I_{t=0} \tau \quad (5)$$

Le rapport I/I_{ref} vaut donc, en combinant (4) et (5) :

$$\frac{I_{ref}}{I} = \frac{1 + \alpha p}{1 + \alpha p_{ref}} = \frac{I}{I + \alpha p_{ref} I} + \frac{p_{ref}}{I + \alpha p_{ref} I} \frac{p}{p_{ref}} \quad (6)$$

On retrouve l'équation de Stern-Volmer (1) avec les valeurs suivantes pour A et B :

$$A = \frac{I}{I + \alpha p_{ref}} \quad B = \frac{p_{ref}}{I + \alpha p_{ref}} \quad (7)$$

Il y donc une stricte équivalence entre l'équation de Stern-Volmer (1) et l'équation (4) donnant la durée de vie de la luminescence.

3. Les méthodes d'exploitation

Les méthodes d'exploitation se classent en deux groupes :

- + Les méthodes utilisant le rapport d'intensité de l'équation de Stern-Volmer Volmer (1). Elles sont appelées "méthodes d'intensité".
- + Les méthodes utilisant la durée de vie.

Ces deux groupes sont ensuite scindés suivant que l'étalonnage de la PSP est effectué en laboratoire avant l'essai (étalonnage "a priori") ou qu'il est effectué durant l'essai à l'aide de prises de pression équipant la maquette (étalonnage "in situ").

3.1. Méthodes d'intensité

Ces méthodes utilisent directement l'équation de Stern-Volmer (1). L'intensité de référence est mesurée avant essai puis elle est divisée par l'intensité mesurée au cours de l'essai. En général,

ces méthodes sont exploitées avec des caméras (voir §5.2), la méthode consistant à diviser l'image de référence, souvent appelée "sans vent", par l'image d'essai, appelée "avec vent".

Au préalable, il faut soustraire aux images une image de fond qui prend en compte la luminosité ambiante et le courant d'obscurité de la caméra. Toutefois, il faut s'attacher à éliminer autant que possible toute source d'éclairement parasite, afin de diminuer l'importance de l'image de fond, appelée plus souvent image d'obscurité. Une correction supplémentaire, dite de "flat-field", est souvent réalisée pour compenser la non-uniformité de la réponse du CCD de la caméra.

Ces deux corrections sont nécessaires, mais pas suffisantes pour une utilisation correcte de la loi de Stern-Volmer. Il faut en effet s'assurer que l'intensité d'excitation n'est pas modifiée entre l'image de référence sans vent et l'image d'essai. Cette condition n'est pratiquement jamais respectée avec la précision requise sur les mesures qui est de l'ordre de 0,1%. Deux solutions sont utilisées pour compenser cette faiblesse : l'étalonnage "in situ" (voir §3.4) ou l'ajout d'un composé de référence à la peinture PSP (voir §5.1). Ce composé doit être insensible à la pression et doit avoir un spectre d'émission bien différencié de celui du composé PSP. Un filtre permet de sélectionner l'image correspondant au composé de référence. Elle est communément appelée image "d'intensité". L'image du composé PSP, dite image "en pression", est alors divisée par l'image "d'intensité", ce qui compense les fluctuations d'intensité. L'étalonnage "in situ" est encore possible, mais il est plus logique d'utiliser un étalonnage en laboratoire dit "a priori".

Enfin, l'application de la loi de Stern-Volmer suppose que les images sont parfaitement alignées. Les forces aérodynamiques exercées sur la maquette induisent des déformations du système supportant la maquette qui engendrent des déplacements dans l'image. Ces déplacements doivent être compensés, ce qui s'effectue à l'aide de logiciels dédiés (voir §5.3). Néanmoins, l'alignement d'image ne compense pas le fait que la maquette bouge dans le champ d'excitation et donc qu'un point sur la maquette ne reçoit pas le même niveau d'énergie avec ou sans vent. Cela est vrai même si la source d'excitation est parfaitement stable. Seule la mesure d'une image de référence, identique à celle utilisée pour compenser les variations d'excitation, permet de résoudre correctement ce problème.

3.2. Méthodes de durée de vie

Comme on vient de le voir, l'utilisation de la loi de Stern-Volmer paraît simple, mais elle requiert de grandes précautions. L'utilisation de la durée de vie (voir équation (4)) semble plus aisée de ce point de vue. La mesure de la durée de vie s'effectue en calculant le taux de décroissance de l'intensité d'émission. Seule la forme de la décroissance est utilisée, pas le niveau absolu. La pression est déduite des mesures en calculant le rapport des durées de vie avec et sans vent. Les fluctuations de l'intensité d'excitation sont donc sans effet. Pour la même raison, la correction de "flat-field" n'est pas indispensable. Il n'est pas non plus nécessaire de compenser les déplacements de la maquette.

La méthode de durée de vie semble donc plus attractive que la méthode classique d'intensité. Néanmoins, elle nécessite des matériels spécifiques (voir §5.1 et §5.2) et la précision obtenue à l'heure actuelle est moins bonne [7,8].

3.3. Etalonnage "a priori"

L'étalonnage "a priori" correspond à la conception classique d'un étalonnage, à savoir qu'il est réalisé en laboratoire avec le matériel approprié et indépendamment des conditions d'essai. Il

requiert un caisson d'étalonnage dans lequel la pression et la température doivent être régulées. Le résultat de l'étalonnage est une loi qui donne la variation du rapport d'intensité ou de la durée de vie en fonction de la température et de la pression.

L'étalonnage "a priori" est utilisé pour évaluer les potentialités d'un revêtement PSP. Comme cela a été signalé plus haut, les revêtements PSP sont aussi souvent sensibles à la température, donc l'utilisation d'un étalonnage "a priori" en cours d'essai suppose soit une PSP peu sensible à la température, soit une mesure de la température. En outre, les variations d'intensité induites par la source d'excitation et par le déplacement de la maquette, doivent être compensées par l'utilisation d'un composé de référence (sauf pour les méthodes de durée de vie).

3.4. Etalonnage "in situ"

L'étalonnage "in situ" est utilisé lorsque l'étalonnage "a priori" ne peut pas être appliqué avec une précision suffisante. Comme cela a été signalé ci-dessus, c'est le cas pour les revêtements sensibles à la température, lorsque la température ne peut pas être mesurée par ailleurs.

La maquette doit être équipée de prises de pression en nombre suffisant. Elles doivent être placées de sorte qu'elles couvrent la plus grande plage de pression possible. Les mesures réalisées en cours d'essai sont comparées avec les informations délivrées par la PSP. On obtient ainsi un étalonnage en cours d'essai.

L'idée sous-jacente à ce type d'étalonnage est que les différentes sources d'erreur sont prises en compte. La compensation n'est toutefois qu'imparfaite. Par exemple, la compensation de l'effet de la température n'est valide que si une bijection entre la pression et la température peut être établie, or ce n'est généralement pas le cas. Les variations du champ d'excitation dues au déplacement de la maquette ne sont pas non plus compensées. Il en résulte que l'image de référence doit être réalisée avec une géométrie très proche de celle de la maquette.

L'étalonnage "in situ" ressemble donc plus à une commodité dont on veut croire qu'elle compensera les effets des sources d'erreur. En pratique, cette méthode est moins précise que celle utilisant l'étalonnage "a priori", au point de limiter sérieusement les applications quand les variations de pression sont faibles, comme en basse vitesse [9].

4. Panorama du développement de la PSP dans le monde

La PSP est utilisée et développée dans pratiquement tous les centres de recherche et d'essai en aérodynamique. Faire l'état des lieux est donc une tâche ardue, et seul un bref résumé peut ici être proposé :

- + **USA.** La PSP fait l'objet de beaucoup d'études et développements aux USA, qui sont incontestablement en position de leader. Il est à remarquer que seuls les revêtements excités dans le visible sont employés.
- + **Russie.** La Russie a développé très tôt un système PSP, notamment un revêtement dont les performances sont encore inégalées. Les développements ont été réduits faute de crédits.
- + **Japon.** Le NAL développe surtout des revêtements dédiés aux applications en cryogénie. Cette activité est réalisée en collaboration avec le DLR.
- + **Europe.** Seuls le DLR, BAé et l'Onera ont une activité de développement. Les autres organismes européens sont en train de mettre en place un système PSP ou ont acheté des systèmes complets.

5. Les matériels et logiciels

5.1. Les peintures et les sources d'excitation

Les composés sensibles à l'oxygène doivent être excités sous une certaine longueur d'onde, et c'est pourquoi il est préférable de présenter simultanément les revêtements et les sources d'excitation. Un classement efficace est obtenu en séparant les revêtements excités sous ultraviolet des revêtements excités dans le visible.

5.1.1. Les peintures excitées dans l'ultraviolet

Les peintures excitées dans l'ultraviolet utilisent des molécules dérivées du pyrène ou des porphyrines de palladium ou de platine. Les peintures à base de pyrène ont un spectre d'émission continu, alors que les peintures utilisant des porphyrines ont un spectre de raies. Elles sont pratiquement toujours associées à un composé de référence destiné à la mesure de l'intensité d'excitation. Ce composé est en général un oxysulfure de terre rare dopé. La principale difficulté est d'assurer une bonne séparation spectrale entre le composé PSP et le composé de référence.

Les sources d'excitation possibles sont :

- + Lampes à vapeur de mercure ou lampes à vapeur de mercure et de xénon. La puissance de ces lampes est modérée, mais suffisante pour les petites installations. Les temps d'exposition sont par contre importants (30s) quand elles sont utilisées dans des grandes installations. La stabilité est bonne, moins de 0,5% par heure, mais insuffisante pour se dispenser du composé de référence.
- + Les lasers azote. Ces lasers sont pulsés, avec une fréquence maximale de 100Hz (sauf pour un laser russe qui monte jusqu'à 1000hz). La puissance peut être élevée et la stabilité est très bonne. Ils sont utilisés dans les systèmes exploitant la durée de vie (voir §3.2 et §5.2.2).
- + Les lampes flash au xénon. La fréquence est de l'ordre de 10Hz. La puissance peut être élevée, mais la stabilité insuffisante impose l'utilisation d'un composé de référence.

5.1.2. Les peintures excitées dans le visible

Les peintures excitées dans le visible sont des porphyrines ou des molécules dérivées du ruthénium. La sensibilité à la température de ces peintures est en général assez élevée, supérieure à 1%/K, de sorte qu'elles sont toujours utilisées avec un étalonnage "in situ" (voir §3.4). L'excitation est obtenue avec des sources visibles : lampes, lasers. Des systèmes à diodes électroluminescentes (tel que ceux commercialisés par ISSI, voir §5.4) sont de plus en plus utilisés car ils sont très stables.

5.1.3. Quelle peinture utiliser ?

De ce qui précède, on peut dresser le tableau 1 des avantages et inconvénients. La conclusion générale pourrait être que les systèmes PSP ayant une excitation dans le visible sont moins onéreux et plus faciles à mettre en œuvre que les systèmes ayant une excitation dans l'ultraviolet. Par contre, ils offrent une précision plus faible du fait de leur sensibilité à la température plus élevée et de l'utilisation de l'étalonnage "in situ".

	UV	visible
sensibilité à la pression	+	
sensibilité à la température		-
étalonnage a priori	+	-
étalonnage in situ	+	+
coût illumination	-	
mise en œuvre	-	

Tableau 1: avantages (+) et inconvénients (-) des excitations dans le visible et l'ultraviolet

5.2. Les moyens de mesures

Les moyens de mesure sont de deux types : caméras ou systèmes de scanning. Les caméras sont toujours des caméras scientifiques, refroidies afin de minimiser les bruits de lecture. Quelques tentatives ont été réalisées afin de se contenter de caméras usuelles, mais sans succès. La raison en est que la précision requise est élevée, de l'ordre de 0,1%, et qu'elle ne peut être obtenue qu'avec des systèmes appropriés.

Les systèmes de scanning comprennent un laser d'excitation, dirigé sur la cible par le système, et un ensemble de mesures constitué d'un ou plusieurs photomultiplicateurs. Ces systèmes ne produisent pas une image instantanée mais permettent d'adopter aussi bien la méthode d'intensité que la méthode de durée de vie.

5.2.1. Méthodes d'intensité

La méthode d'intensité est généralement appliquée avec des caméras. Un porte filtre est placé devant la caméra afin de sélectionner la longueur d'onde d'émission de la PSP. Pour les peintures qui incluent un composé de référence, il faut prendre deux images et utiliser deux filtres. Un dispositif permet de changer le filtre devant la caméra, mais les deux images ne sont plus synchrones. Pour contrer ce problème, le DLR a développé un système à deux caméras accolées. La prise de vue est simultanée, mais il faut aligner les deux images avant de poursuivre les opérations de traitement.

Les CCD des caméras sont de très bonne qualité sans toutefois être parfaits. Les pixels n'ont pas tous la même réponse, ce qui nécessite une correction appelée correction de "flat-field". Cette correction est indispensable pour les systèmes à une image et pour le système à 2 caméras. Seul le système de la caméra utilisée avec un porte filtre permet de se dispenser de la correction de "flat-field".

5.2.2. Méthodes de durée de vie

L'exploitation de la méthode de la durée de vie se fait aussi bien avec des caméras qu'avec des photomultiplicateurs :

+Caméras. Il s'agit de caméras spécifiques qui permettent de prendre deux images à des temps très rapprochés. Ces deux images sont prises après le flash d'excitation, au cours de la décroissance du signal luminescent. Le rapport entre les deux images permet d'identifier le taux de décroissance, et donc la durée de vie de la luminescence. Plusieurs séries d'images sont nécessaires pour obtenir une précision suffisante [7].

+Photomultiplicateurs. La décroissance de la luminescence est enregistrée puis utilisée pour identifier le taux de décroissance. Comme pour les caméras, plusieurs acquisitions sont

nécessaires mais elles sont réalisées plus rapidement. Cet avantage est réduit du fait du temps de formation de l'image [10].

5.3. Les logiciels

Des logiciels [11,12] sont utilisés au cours du traitement PSP pour deux raisons principales :

- + Reconnaissance de la maquette dans l'image pour l'extraction des données. Les images ne sont en effet quantitatives que lorsqu'il est possible d'associer à chaque pixel de l'image un point réel sur la maquette.
- + Compensation des déplacements de la maquette dans l'image. Les maquettes se déplacent lors des changements de condition d'essai (incidence) ou sous l'effet des forces aérodynamiques.

Les méthodes permettant de prendre en compte ces effets sont appelées méthodes de "recalage". Le terme consacré en anglais est "resection", qui est intraduisible en français sauf sous sa forme littérale qui est résection! Néanmoins l'expression "resection method" identifie parfaitement les opérations précitées appliquées en soufflerie.

Les logiciels de recalage effectuent les opérations suivantes :

- + Identification (plus ou moins automatisée) de marqueurs placés sur la maquette. Cette étape comprend l'identification des marqueurs dans l'image et leur association (étape dite de "matching") avec des marqueurs réels dont les positions sur la maquette sont connues.
- + Reconnaissance de la position de la caméra relativement à la maquette, en utilisant les marqueurs préalablement identifiés.
- + Alignement des images (dans le cas de la méthode d'intensité) pour compenser les mouvements apparents de la maquette. Les méthodes les plus évoluées utilisent un maillage de la maquette qui doit être préalablement disponible.
- + Extraction des résultats selon des coupes ou des points déterminés à l'avance. Le maillage de la maquette est indispensable pour associer à tout pixel de l'image un point réel.

Les logiciels de recalage utilisés dans la PSP comportent en outre de nombreux outils de traitement d'images et des modules complémentaires, comme par exemple la gestion des étalonnages. A titre d'exemple, le logiciel développé par l'Onera permet la réalisation de toutes les étapes d'un dépouillement PSP. Il est fortement automatisé et dispose d'un système de macros autorisant des applications industrielles.

5.4. Comment s'équiper ?

Il est possible d'acheter un système PSP complet ou de le construire à partir d'éléments commerciaux existants. Le coût est de l'ordre de 500kF. Les systèmes complets peuvent être acquis auprès de sociétés comme :

- + OMT, Allemagne, www.omt.via.t-online.de. OMT commercialise les peintures OPTROD (à base de pyrène) et vend un système complet incluant l'illuminateur UV, la caméra et le logiciel.
- + ISSI, USA, www.innssi.com. ISSI commercialise des peintures excitées dans le visible. ISSI vend aussi bien des éléments (illuminateur, caméra, logiciel) qu'un système complet.
- + Boeing, USA. Sous certaines conditions, Boeing vend son système PSP, qui utilise une peinture à base de ruthénium (excitation dans le visible).

La construction d'un système à partir de sources différentes ne pose pas de difficulté importante. Des caméras de qualités peuvent être obtenues auprès de nombreux constructeurs (Roper

Scientific, Hamamastu, etc ...) de même que les illuminateurs (visible : ISSI, UV : Lot Oriel, Hamamatsu etc...). Les points les plus délicats sont la peinture et le logiciel. A notre connaissance, seuls OMT et ISSI commercialisent des peintures. Il est néanmoins possible d'en fabriquer à partir de recettes publiées (voir [5,6]) qui ne nécessitent que du matériel ordinaire.

En ce qui concerne le logiciel, pratiquement tous les organismes de recherche ont développé des solutions maison, plus ou moins abouties. Boeing dispose d'un système sophistiqué, mais non commercialisé. ISSI vend le logiciel OMS, développé initialement au TsAGI tandis que OMT ne distribue pas de logiciel en dehors du système complet. L'Onera distribue gratuitement son logiciel AFIX2, bientôt disponible sur son site internet.

Néanmoins, disposer du matériel ne suffit pas pour réaliser un essai PSP. Un personnel qualifié est indispensable comme pour toutes les méthodes optiques.

6. Un exemple d'application en basse vitesse

6.1. Pourquoi cet exemple ?

La PSP a été initialement développée pour des applications en transsonique, domaine pour lequel la demande était la plus pressante. Les équipes se sont ensuite attachées à étendre le domaine d'application, en particulier en basse vitesse. Mais les difficultés sont paradoxalement plus grandes parce que les variations de pression sont très faibles.

Les applications en basse vitesse sont donc difficiles, et pourtant elles peuvent intéresser de nombreuses équipes ne disposant pas des moyens nécessaires à la réalisation d'essais en transsonique et en supersonique. L'exemple qui suit a donc été choisi car il présente plus d'intérêt pratique pour le lecteur qu'un exemple d'application en transsonique.

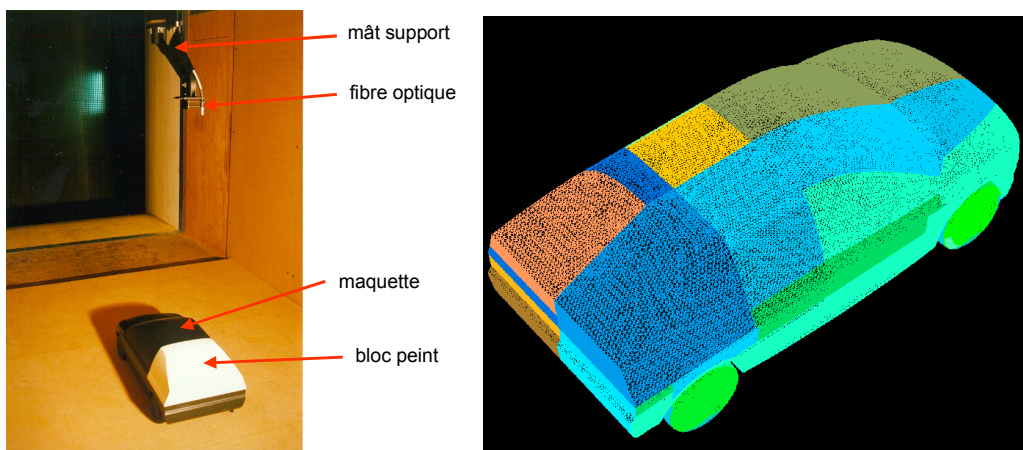


Figure 4: maquette de voiture PSA 206 dans la soufflerie T4Po de l'ENSMA

6.2. La maquette et la soufflerie

Les essais ont été réalisés en coopération avec PSA [13] sur une maquette représentant une voiture 206 à l'échelle 1/5. La lunette arrière a été remplacée par une lunette plane. La figure 4 montre une vue de dessus de la maquette sur laquelle la planéité de la lunette arrière apparaît assez nettement. La maquette est constituée d'un bloc principal, qui comprend l'avant et le toit

du véhicule, et d'un bloc secondaire représentant la lunette. Seul le bloc secondaire a été peint. Il se distingue nettement car la peinture PSP est blanche. La partie droite de la figure montre le maillage de la maquette. Il comporte 51451 points et 102777 triangles. La maquette était équipée de quelques prises de pression situées sur trois lignes, présentées sur la figure 5.

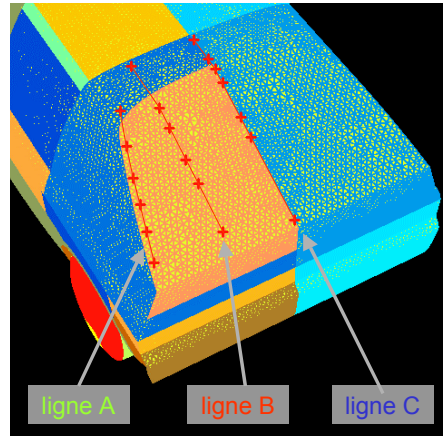


Figure 5: équipement en prises de pression.

La soufflerie T4Po de l'ENSMA est une soufflerie basse vitesse dont la section d'essai est de 2,4mx2,6m pour une longueur de 5m. Sa vitesse maximale est de 80m/s. Il s'agit d'une soufflerie à retour, ce qui est un point positif du point de vue de l'obscurité. Enfin, elle fait partie d'un ensemble bétonné massif qui assure une bonne stabilité thermique. La variation de la température génératrice au cours de l'essai ne dépasse pas 1K. Comme cela est souvent le cas pour les souffleries basse vitesse, la veine est équipée en standard de parois latérales transparentes. Afin de garantir une bonne obscurité, ces parois ont été occultées à l'aide de panneaux en bois et de films autocollants.

6.3. Le système PSP

Les essais en basse vitesse requièrent une peinture ayant une sensibilité à la température aussi faible que possible. La peinture utilisée, mise au point au Département d'Aérodynamique Fondamentale et Expérimentale (DAFE) de l'Onera, est un revêtement constitué de deux composés luminescents excités sous UV.

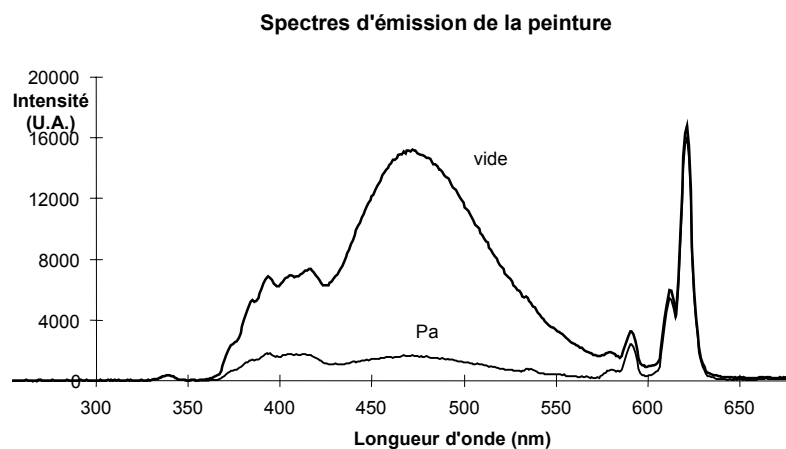


Figure 6: spectre d'émission de la PSP

Le premier composé, sensible à la pression, est du pyrène. Il présente deux domaines d'émission de luminescence dans le bleu, centrés respectivement à 400nm (émission du monomère du pyrène) et 480nm (émission de l'excimère du pyrène). Le deuxième composé luminescent est un oxysulfure de terre rare (gadolinium). Il est insensible à la pression et est utilisé pour corriger les variations de l'excitation au cours de l'essai. Sa luminescence est un spectre de raies dont la plus intense est centrée à 626nm (émission dans le rouge). Ces deux composés sont mélangés dans une résine silicone RTV118 (General Electric) qui présente la particularité d'être perméable à l'oxygène, condition indispensable pour enregistrer une sensibilité du pyrène à la pression. La figure 6 donne le spectre de la peinture au vide et à la pression ambiante.

Le rapport des deux émissions (bleue/rouge) élimine presque totalement la sensibilité à la température de la peinture. L'utilisation de cette PSP à deux composés nécessite d'enregistrer deux images (d'où le porte-filtre visible sur la figure 7) pour chaque point de mesure et de calculer le rapport de l'image bleue sur l'image rouge pour obtenir une information proportionnelle à la pression.

Le revêtement utilisé peut sembler idéal de part sa bonne sensibilité à la pression et sa quasi-insensibilité à la température, mais il présente néanmoins un défaut important. Il se dégrade de manière significative sous l'action du vent. Cela est dû au pyrène qui se sublime et tend à disparaître du revêtement. Cet effet est accentué par l'écoulement aérodynamique et il est possible d'atteindre une perte de 10% par heure. Pour compenser ce phénomène, des images de référence sont prises avant et après essai afin de calculer une image de référence virtuelle prenant en compte le temps de soufflage.

La dégradation observée au cours de l'essai est un défaut important du revêtement et l'Onera aussi bien que le DLR effectuent des études pour éliminer ce défaut. L'objectif final est d'obtenir un revêtement stable, semblable à la peinture B1 développée par le TsAGI et commercialisée par la société OMT (voir §5.4).

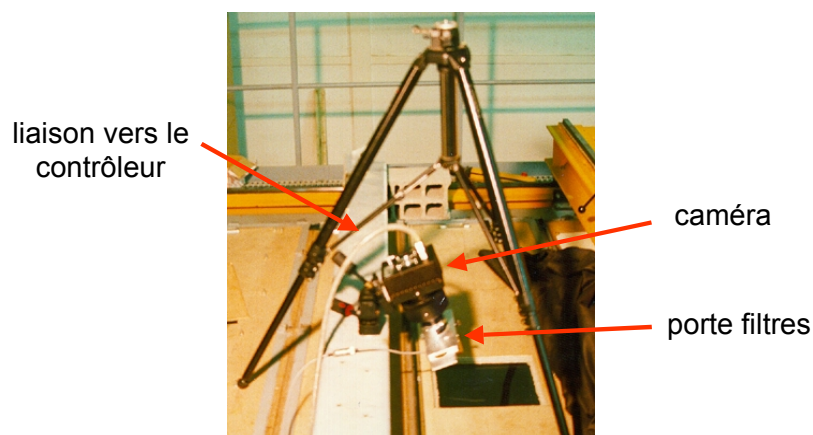


Figure 7: installation de la caméra PSP au-dessus de la veine d'essai.

Le système PSP Onera utilise une caméra PRINCETON très sensible (rendement quantique de 80% à 650nm). Le contrôleur de la caméra assure son alimentation, régule la température et numérise les images sur deux octets. La figure 7 montre l'installation de la caméra au-dessus de la paroi supérieure de la veine d'essai. La caméra est reliée par un câble au contrôleur qui assure l'interface avec le PC d'acquisition. Un objectif NIKON de 50mm est monté sur la

caméra. Devant cet objectif est placé le porte-filtre. On remarquera la présence d'un pied photo dont la fonction est de supporter un drap noir permettant de maintenir la caméra dans l'obscurité.

La source utilisée est une lampe à vapeur de Mercure d'une puissance de 500W. Elle couvre une grande partie du domaine spectral UV et est ventilée afin de garantir une bonne stabilité au cours du temps (mesurée à 0,5% par heure après 30 minutes de stabilisation de la température de l'arc et des filtres optiques). Un filtre optique liquide, placé en sortie de la lampe, permet de filtrer le rayonnement IR indésirable et d'éviter l'échauffement du filtre d'excitation UV au cours du temps. Le filtre UV placé derrière, centré à 325nm (d'une largeur de 30nm), permet de sélectionner le domaine d'excitation de la peinture et coupe les longueurs d'onde supérieures. Un obturateur assure un contrôle du temps d'exposition et limite une éventuelle photodégradation du revêtement.

Cette source est suffisamment puissante pour être couplée à une fibre optique liquide (appelée ainsi car elle contient un liquide) ayant une haute transmittance dans l'ultraviolet. Ce couplage s'avère indispensable en soufflerie pour pallier les difficultés d'accès optiques. La fibre (voir fig.4) a été montée sur un mât utilisé normalement comme support de sonde. Elle est située à approximativement 1m de la maquette. L'ensemble a été positionné afin d'assurer un éclairage le plus efficace possible sans toutefois perturber l'écoulement au voisinage de la maquette.

6.4. La reconnaissance de la position de la maquette dans l'image.

Des marqueurs ont été placés sur la maquette comme cela est visible sur la figure 8a. Des outils de traitement d'image permettent de les mettre en évidence assez facilement, comme sur la figure 8b, réalisée avec un opérateur de gradient. On remarquera sur cette figure que des points supplémentaires sont visibles : ce sont les prises de pression, à peine décelables sur la figure 8a. Quelques défauts sont également visibles, qui doivent être éliminés par la suite.

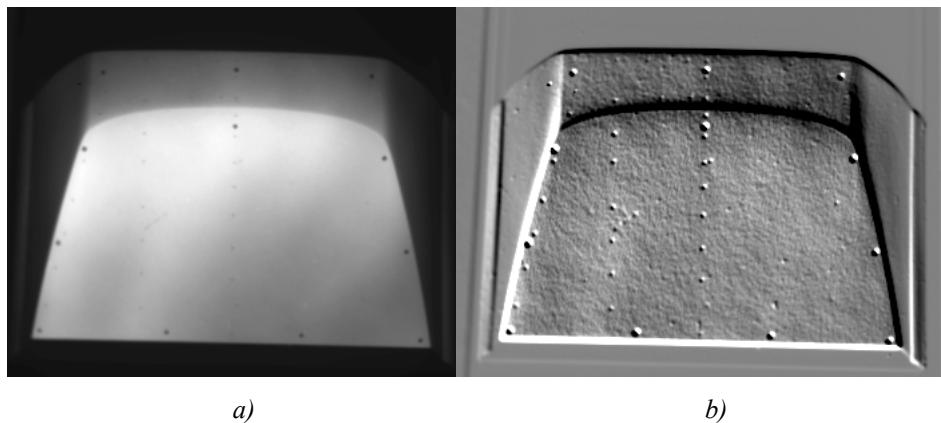


Figure 8: les marqueurs et leur mise en évidence.

Un outil de détection des marqueurs a été développé spécifiquement pour les marqueurs circulaires. Cet outil, appelé SPOT, effectue la corrélation avec une fonction en chapeau haut de forme. Divers paramètres, comme le diamètre du chapeau, permettent de discriminer les marqueurs des prises de pression. Il n'en demeure pas moins que la détection dans l'image peut manquer quelques marqueurs tout comme elle peut inclure de faux candidats. Un outil dit de "matching" permet d'établir l'association avec les marqueurs réels. Il utilise la position réelle des marqueurs, ce qui permet d'éliminer aisément les marqueurs images qui sont dus à des défauts de peinture.

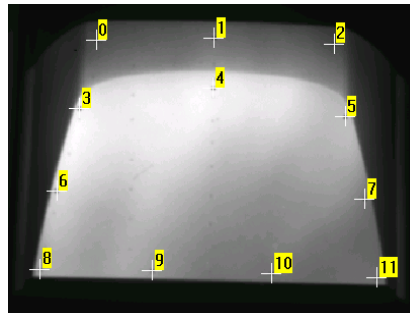


Figure 9: détection automatique des marqueurs.

La figure 9 donne le résultat de la détection des marqueurs et de l'opération de "matching" avec les marqueurs réels. Les marqueurs sont tous détectés et associés correctement. L'automatisation de ces opérations est possible si une restitution en temps réel des résultats PSP est recherchée, comme c'est le cas pour les essais industriels.

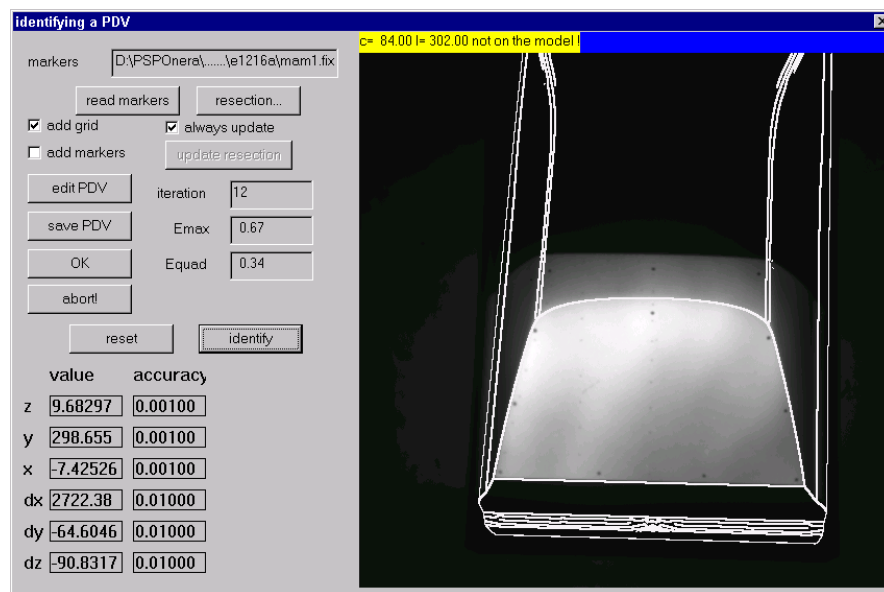


Figure 10: identification des conditions de prise de vue.

L'étape suivante est la détermination de la position caméra par rapport à la maquette. Elle est définie par 6 paramètres qui sont 3 rotations et 3 translations. Ces paramètres sont appelés paramètres externes, par opposition aux paramètres internes de la caméra dont le plus important est la distance focale. Ce problème d'identification est bien connu dans le domaine de la vision artificielle et de nombreuses solutions ont été proposées. La solution adoptée par l'Onera consiste à minimiser l'écart quadratique entre la position des marqueurs et leur position estimée. L'algorithme utilisé est particulièrement robuste et s'accommode d'une estimation initiale éloignée de la position finale. La figure 10 montre le résultat de l'identification, avec la superposition en blanc du contour du maillage. L'accord est en général excellent, de l'ordre de quelques dixièmes de pixel.

6.5. Le déroulement des essais

Le but de ces essais était de démontrer l'applicabilité de la PSP en basse vitesse, de 30m/s à 50m/s. La maquette est à l'échelle 1/5 hormis la lunette arrière qui a été remplacé par un plan afin d'effectuer une étude générique sur le comportement des tourbillons créés à la jonction entre le toit et le hayon.

Les essais PSP en basse vitesse se déroulent suivant le protocole suivant :

- + Prise des images d'obscurité.
- + Prise des images de référence avant essai.
- + Mise en route de la soufflerie, attente de la stabilisation en vitesse et prise des images d'essai.
- + Arrêt de la soufflerie et prise des images de référence après essai.

Des images de références sont prises avant et après l'essai, afin de compenser la dégradation du revêtement (voir §6.3).

Les prises de vues sont réalisées en prenant 10 images pour chacun des filtres, soit 20 images en tout. Ces images sont ensuite moyennées pour atténuer les bruits liés au fonctionnement de la caméra. Certains auteurs effectuent jusqu'à 64 prises de vue! La durée totale de la séquence d'images est de l'ordre de 5mn. L'illumination ultraviolette est coupée entre les séries de prises de vue.

Le dépouillement des essais est réalisé immédiatement après la prise des images de référence après essai. Les résultats ont été obtenus environ 15mn plus tard. Ce délai peut être réduit à quelques minutes dans un contexte industriel, comme c'est le cas dans les souffleries de l'Onera à Modane-Avrieux.

6.6. Les résultats

La figure 11 donne la carte du coefficient de pression à 40m/s. L'image est non filtrée et on peut y observer nettement la trace des deux tourbillons qui prennent naissance à la jonction du toit et du hayon. L'image fait apparaître une dissymétrie dont l'origine est un calage aérodynamique imparfait de la maquette.

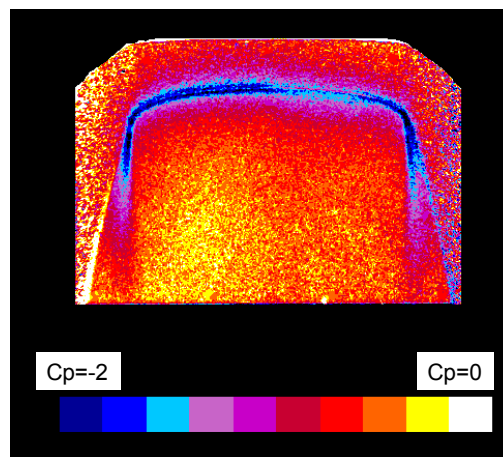


Figure 11: carte de coefficient de pression à 40m/s

Le logiciel AFIX2 de l'Onera [12] a été utilisé pour calculer les images en pression. Il permet l'extraction de toutes les données pertinentes, en particulier pour effectuer une comparaison avec les prises de pression. Il permet aussi la création d'images virtuelles comme celle qui est présentée sur la figure 12. Ce type d'image virtuelle est utilisé pour l'alignement d'image et aussi pour aider à une meilleure compréhension des phénomènes aérodynamiques.

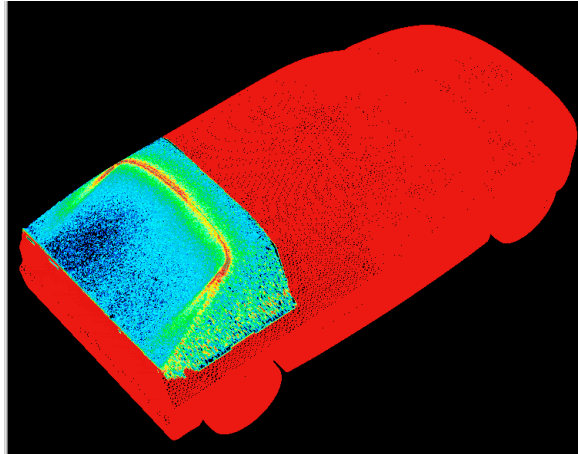


Figure 12: vue virtuelle 3D de l'essai à 40m/s

Les comparaisons avec les prises de pression sont présentées sur les figures 13 (40m/s), 14 (30m/s) et 15 (50m/s). Une barre d'erreur de 1mb a été ajoutée aux prises de pression pour aider à l'appréciation de la précision de la PSP. L'accord est en général meilleur que 1mb avec un écart type de 0.5mb.

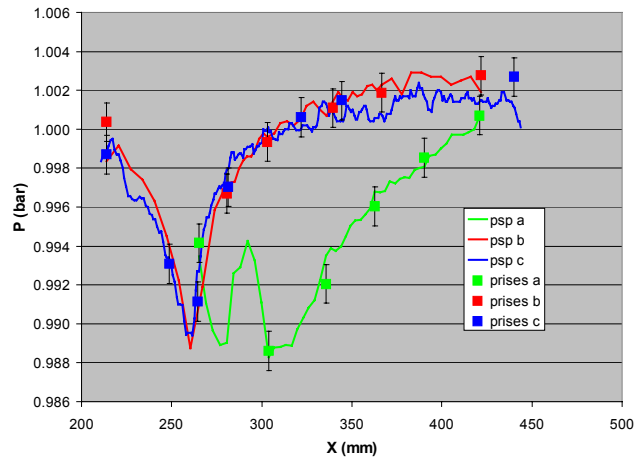


Figure 13: comparaison avec les prises de pression à 40m/s

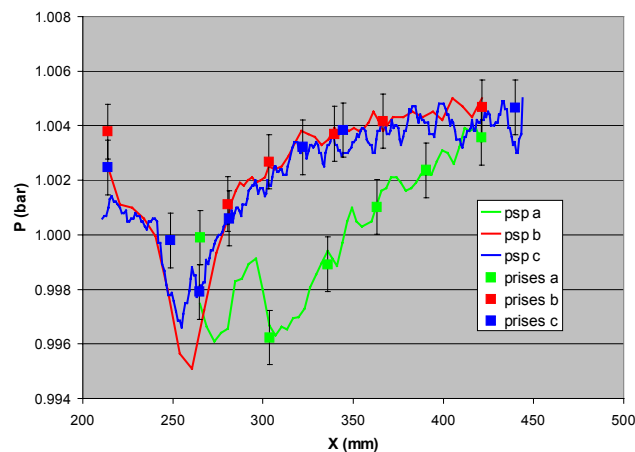


Figure 14: comparaison avec les prises de pression à 30m/s

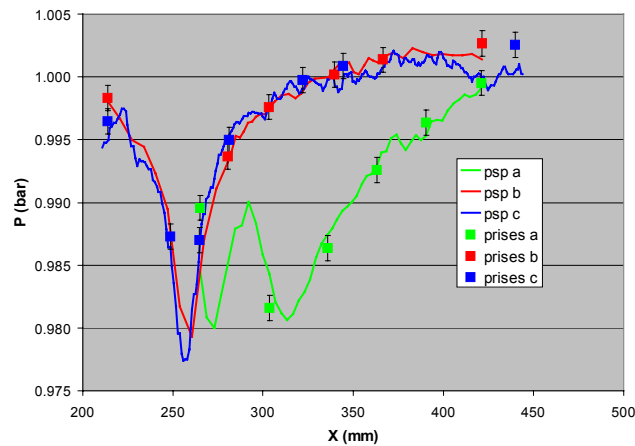


Figure 15: comparaison avec les prises de pression à 50m/s

Il ressort des trois figures précédentes que la ligne A, située la plus à gauche (voir la figure 5) sur la lunette, montre un comportement très différent des deux autres lignes de prises de pression. L'explication en est donnée sur la figure 16 qui est un zoom sur les trois premières prises de pression de la ligne A. Cette ligne part du toit, rejoint la lunette puis traverse la trace du tourbillon sur la lunette. Il apparaît deux régions de survitesse : la première est similaire à celle des lignes B et C, c'est-à-dire la jonction toit/lunette ; la deuxième correspond à la traversée du tourbillon.

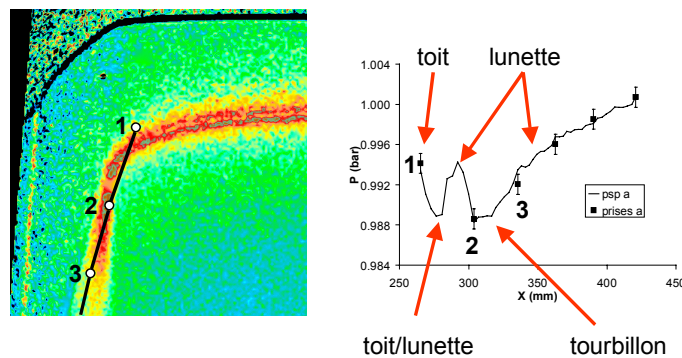


Figure 16: détail sur la ligne A.

6.7. L'apport de la PSP par rapport aux prises de pression

La ligne A n'est donc pas bien placée pour capter les survitesses induites par les tourbillons, alors que c'était sa fonction. En outre, il apparaît clairement sur les figures 13 à 15 que la survitesse à la jonction toit/lunette est sous estimée par les prises de pression.

La PSP apporte des informations difficilement accessibles avec les équipements classiques. La figure 17 est un exemple extrême obtenu lors d'un essai en supersonique sur un nouveau concept de tuyère [14]. La carte en pression est complexe et n'aurait pas pu être obtenue avec des prises de pression. C'est donc la richesse d'information apportée par la PSP qui lui confère tout son intérêt.

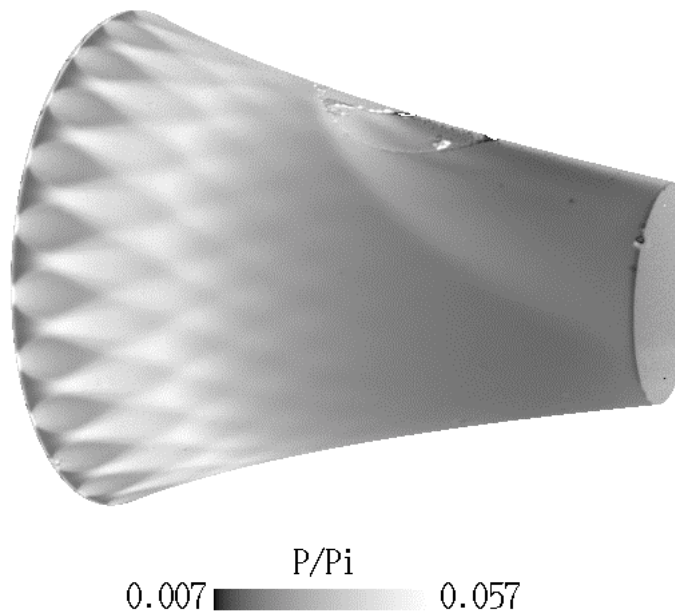


Figure 17: essai PSP en supersonique sur une tuyère à corps central.

7. Les développements en cours

La PSP est maintenant une technique bien établie, au moins pour les essais en transsonique et en supersonique. Les études actuelles tendent à en étendre le champ d'application et à corriger des défauts résiduels. La liste qui suit n'est certainement pas exhaustive, mais elle est représentative des grandes tendances actuelles :

- + **Auto-illumination.** Les peintures émettent de la lumière dans toutes les directions, et il peut se produire des réflexions sur la maquette elle-même qui viennent fausser les mesures. La correction de cet effet est possible [15,16], mais elle est particulièrement lourde. Il faut en effet caractériser le comportement optique des revêtements et implémenter un logiciel de type "ray-tracing" similaire à ceux utilisés pour la création d'images de synthèse.
- + **Stabilité des peintures.** Les peintures à base de pyrène sont particulièrement intéressantes du fait de leur faible sensibilité à la température, mais la volatilité du pyrène fait qu'elles se dégradent assez rapidement. Des travaux sont en cours pour fixer le pyrène et le rendre stable[17].
- + **Compensation de l'effet de température.** La compensation de l'effet de température impose l'utilisation d'un deuxième composé, dont la sensibilité à la température doit être similaire à celle du composé PSP. Ces travaux concernent principalement les peintures excitées dans le visible.
- + **Effet de la PSP sur l'écoulement.** Comme tout revêtement, la PSP peut modifier l'écoulement autour de la maquette. Des études expérimentales ont été réalisées [18,19] sur ce sujet et d'autres études vont venir les compléter. Il semble que l'effet de la PSP ne soit sensible qu'à haut Reynolds, mais les interactions entre la peinture et l'écoulement sont encore mal comprises.
- + **Développement de caméras et de source d'illumination.** Les sources d'illumination dans l'ultraviolet disponibles dans le commerce ne sont pas assez puissantes. Le DLR effectue des développements importants dans ce domaine [20]. Le développement des caméras est plus le fait des constructeurs.

- + **Développement des méthodes utilisant la durée de vie.** Les méthodes exploitant la durée de vie (voir §2.4) doivent permettre de se passer de l'image de référence indispensable pour la méthode d'intensité. Cela conduit théoriquement à un gain de précision et de productivité, mais ces bénéfices n'ont pas encore été démontrés [7].
- + **Application en instationnaire.** Aucun revêtement PSP actuel ne peut être utilisé en instationnaire. En effet, le composé PSP est dilué dans une matrice poreuse et le temps de réponse est lié à la porosité de cette matrice. Les applications en instationnaire requièrent une chimie différente [21][22].
- + **Application en hypersonique.** Les applications en hypersonique posent à la fois les problèmes de la sensibilité à la température et du temps de réponse [21].
- + **Application en cryogénie.** La PSP ne peut actuellement pas être utilisée dans la grande soufflerie européenne ETW, ce qui est un handicap certain pour ce moyen d'essai. Les difficultés sont importantes : absence d'oxygène, froid, effet du revêtement sur l'écoulement. Des travaux sont en cours, dont une conséquence est l'introduction d'une faible quantité d'oxygène dans l'écoulement.
- + **Prise en compte de la déformation des maquettes.** Les maquettes se déforment sous l'action des forces aérodynamiques. L'extraction des données ne prend pas en compte ce phénomène, mais cela est théoriquement faisable [23]. Des études sont en cours, dont un sous-produit important sera la mesure en cours d'essai de la déformation des maquettes.

8. Conclusion

La mesure de la pression à l'aide de revêtements sensibles à la pression est un fait acquis, démontré avec succès par un grand nombre d'essais. Les applications en transsonique sont bien maîtrisées et les applications en basse vitesse sont possibles même si elles sont plus délicates. Les développements portent sur l'amélioration de la précision et sur l'extension du domaine d'application. Il ne fait pas de doute que la PSP sera dans un proche avenir utilisée de manière routinière et sur un vaste éventails de configurations.

Références

- [1] **Troyanovsky I., Sadovskii N., Kuzmin M., Mosharov V., Orlov A., Radchenko V., Phonov S.,** Set of luminescence pressure sensors for aerospace research, *Sensors and Actuators B*, vol.11, pp 201-206, 1993.
- [2] **Donovan J.F., Morris M.J., Pal A., Benne M.E., Crites R.C.,** Data Analysis Techniques for Pressure- and Temperature-Sensitive Paint, 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Paper AIAA 93-0176, 1993.
- [3] **Vollan A., Alati, L.,** A New Optical Pressure Measurement System, 14th ICIASF Congress, Rockville, 1992.
- [4] **Bell J.H., Shairer E.T., Hand L.A., Mehta R.D.,** Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 33, pp. 155-206, March 2001.
- [5] **Sullivan J.,** Temperature and Pressure Sensitive Paint, Lecture Series 2000-2001, Advanced Measurement Techniques, Von Karman Institute for Fluid Mechanics, January 2001.
- [6] **Mébariki Y.,** Peintures Sensibles à la Pression : Application en Soufflerie Aérodynamique, Thèse présentée à l'Université de Lille 1, 1998.
- [7] **Bencic T.J.,** Calibration of Detection Angle for Full Field Pressure-Sensitive Paint Measurement, 39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, Paper AIAA 2001-0307, January 2001.
- [8] **Bell J.,** Accuracy Limitations of Lifetime-Based Pressure Sensitive Paint Measurements, 19th ICIASF, Clevelan, OH, August 27-39, 2001.
- [9] **Shimbo Y., Mehta R.D., Cantwell B.J.,** Vortical Flow Field Investigation Using the Pressure Sensitive Paint Technique At Low Speed, 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 97-0388, January 1997.
- [10] **Davies A.D., Bedwell D.J., Dunleavy M., Brownjohn N.,** Pressure Sensitive Paint Limitations and Solutions, 17th ICIASF, Pacific Grove, CA, 1997.

- [11] **Bell J.H., McLachlan B.G.**, Image Registration for Luminescent Paint Sensors, 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Paper AIAA 93-0178, 1993.
- [12] **Le Sant Y., Deléglise B., Mébarki Y.**, An Automatic Image Alignment Method Applied to Pressure Sensitive Paint Measurements, 17th ICIASF, Pacific Grove, CA, 1997.
- [13] **Aider J-L., Elena L., Le Sant Y., Bouvier F., Merienne M-C., Peron J-L.**, Pressure Sensitive Paint for Automotive Aerodynamics, 2001 SAE, Detroit, paper 2001-01-0627, 2001.
- [14] **Hallard R., Mérienne M.-C.**, Aerospike Nozzle Tests, 3rd Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, 1998.
- [15] **Ruyten W, Fisher C.**, On the Effects of Reflected Light in Luminescent Paint Measurements, 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2000-0833, January 2000.
- [16] **Le Sant Y.**, Overview of the Self-Illumination Effect Applied to Pressure Sensitive Paint Applications, 19th ICIASF, Clevelan, OH, August 27-39, 2001.
- [17] **Soumagne-Schweyckart I.**, Formulation of Pressure Sensitive Paints for Unsteady Measurements, 19th ICIASF, Clevelan, OH, August 27-39, 2001.
- [18] **Vanhoutte F.G., Ashill P.R., Garry K.P.**, Intrusion Effects of Pressure Sensitive Paint in Wind-tunnel Tests on Wings, 21st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, AIAA 2000-2525, June 2000.
- [19] **Mébarki Y., Grenier M., Thain J.**, Comparison of Pressure Sensitive Paints on a Supercritical Wing at Cruise Speed, 9th International Symposium on Flow Visualization, Edinburgh, UK, paper 207, 2000.
- [20] **Engler R.H., Klein C.**, First Results Using the New DLR PSP System - Intensity and Lifetime Measurements, Wind Tunnels and Wind Tunnel Test Techniques, Cambridge, UK, April 14-16, 1997.
- [21] **Nakakita K., Yamazaki T., Asai K.**, Pressure Sensitive Paint Measurement in a Hypersonic Shock Tunnel, AIAA-2000-2523, June 2000.
- [22] **Soumagne-Schweyckart I.**, Formulation of Pressure Sensitive Paint for Unsteady Measurements, 19th ICIASF, Clevelan, OH, August 27-39, 2001.
- [23] **Liu T, Radeztsky R.H, Garg G. and Cattafesta L.N.**, A Videogrammetric Model Deformation System and its integration with Pressure Paint, 37th AIAA, Reno, Nevada, paper 99-0568, January 1999.