

LES LASERS



Marc FERRETTI

L'ANÉMOMÈTRE À LASER

LA mécanique des fluides est l'une des disciplines les plus complexes qui soit : elle traite de l'écoulement de fluides gazeux ou liquides dans des conduites, ou autour d'obstacles placés au sein de l'écoulement.

Un fluide est un milieu déformable. Il épouse toujours les contours du récipient qui le contient, quelle que soit la forme de ce récipient. Lorsqu'il s'écoule d'un récipient vers un autre récipient, le fluide épouse encore le profil des conduits qu'il traverse, tout en contournant les obstacles éventuels qu'il rencontre, et qui perturbent son mouvement. Le mouvement de ce fluide est dit « tridimensionnel » : chaque point de l'écoulement est caractérisé par sa propre vitesse.

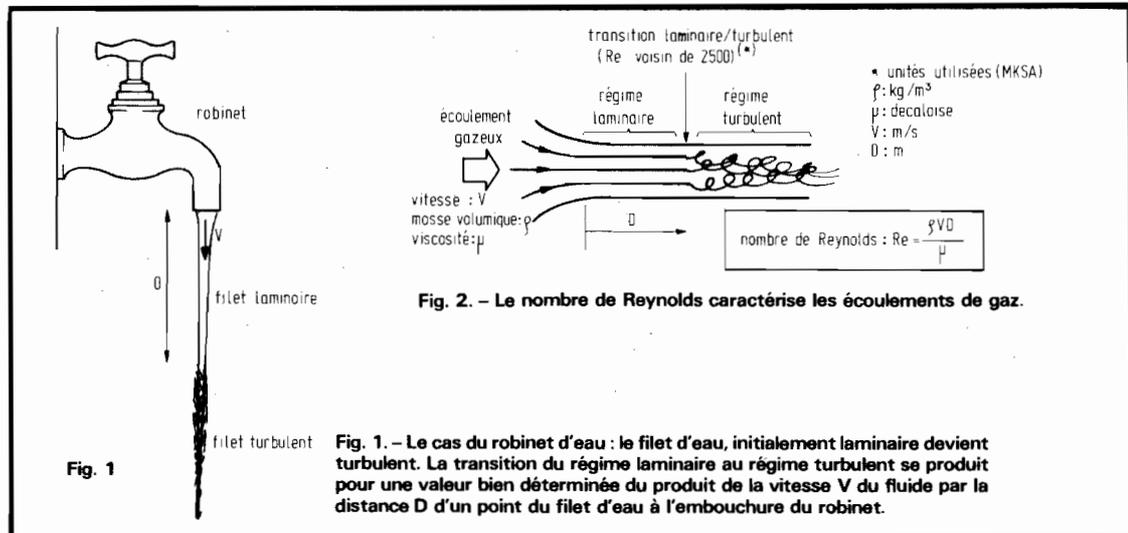
L'ingénieur, le chercheur, le technicien qui travaillent dans cette discipline doivent toujours chercher à déterminer la vitesse locale d'un écoulement de fluide. Souvent, divers phénomènes viennent compliquer le problème du spécialiste : par exemple, dans l'étude de l'écoulement de gaz à grande vitesse, la masse volumique (donc sa densité) varie avec la vitesse. On est alors amené à résoudre des problèmes tridimensionnels à masse volumique variable : leur formulation mathématique

est souvent extrêmement ardue et leur résolution exige généralement l'emploi d'ordinateurs à grande capacité de mémoire.

Dans certains cas, la température des parois des conduites, ou celle des obstacles est différente de la température du fluide. Des transferts de chaleur se produisent, et ceux-ci sont plus ou moins intenses selon que l'écoulement du fluide est plus ou moins rapide. Un exemple classique du phénomène est celui de « l'assiette à soupe » : si la soupe est trop chaude, il faut souffler

dessus pour la refroidir ; physiquement, on est en présence d'un écoulement d'air frais (le souffle) à la surface d'un liquide chaud ; et ce dernier a tendance à céder rapidement ses calories en présence de cet écoulement d'air externe ; mathématiquement, la résolution du problème de « l'assiette à soupe » requiert l'introduction d'équations exprimant les transferts thermiques, et celles-ci sont couplées aux équations donnant la vitesse de l'air à la surface du liquide à refroidir... c'est une complication supplémentaire, et non la dernière !

Voici une nouvelle complication : la turbulence. Examinez le filet d'eau sortant d'un simple robinet. Si le débit est faible, on a l'impression d'avoir un filet bien lisse, comme une tige de verre : on dit que l'écoulement est « laminaire ». Si le filet est assez long, il devient « turbulent » après un certain parcours : le filet fluide devient trouble. Maintenant, augmentons le débit d'eau : la longueur laminaire diminue, et le filet d'eau a tendance à devenir turbulent plus tôt (fig. 1).



MAQUETTE OU ORDINATEUR ?

Tous les phénomènes précédents sont extrêmement importants. Il faut les introduire dans les calculs de mécanique des fluides, afin d'obtenir des solutions les plus proches possible de la réalité.

Il existe de très nombreux cas où la résolution de tels problèmes s'avère nécessaire. En aéronautique, il est indispensable de calculer les profils optimaux des ailes d'ailerons, des ogives de fusée, ou encore des aubages d'étages de compression et de détente, dans les turbo-réacteurs. Au niveau industriel, on trouve de nombreux problèmes similaires : les fluides sont, en effet, d'excellents « véhicules » de l'énergie et aussi des bons « outils » de lubrification ; ils servent dans de nombreux organes de machines : entraînement de moteurs (turbine à vapeur, à gaz, moteur à combustion interne, moteur Diesel...), lubrification de mécanismes (paliers, butées, joints d'étanchéité...).

Le calcul, en mécanique des fluides, est indispensable, au moyen d'un ensemble d'équations différentielles, dites de Navier-Stokes. Leur résolution exige l'emploi des ordinateurs, et les méthodes de résolution sont généralement très sophistiquées (méthode des différences finies, méthode des éléments finis, par exemple), mais fastidieuses à mettre en œuvre. Certains problèmes ne peuvent pas être programmés sur ordinateur ; ainsi le phénomène de turbulence n'a pas encore de solution purement théorique.

En somme, on se trouve confronté à deux types de problèmes : ceux pour lesquels l'analyse théorique est possible, mais alors elle est extrêmement compliquée ; ceux qu'aucune théorie ne peut, à ce jour décrire. C'est pourquoi l'expérimentation, en mécanique des fluides, doit toujours compléter une analyse théorique. Mais, à vrai dire, l'un ne va pas sans l'autre : un essai coûte cher, et il convient de le préparer par une étude purement théorique qui optimisera, certains paramètres ; l'essai servira à établir la valeur d'autres paramètres, et à confirmer expérimentalement la valeur des paramètres calculés précédemment. Ces essais se font, soit sur maquettes réduites

en soufflerie (calcul d'éléments d'avions ou de fusées, étude de la tenue au vent d'immeubles, détermination de la résistance de l'air à l'avancement de trains rapides ou d'automobiles), ou sur prototypes en grandeur réelle (turbo-machine).

Que mesure-t-on en général ?

La température du fluide est un paramètre aisément accessible. La pression peut, aussi être mesurée. En aérodynamique, on cherche à déterminer également la vitesse locale des fluides. On peut, parfois mesurer directement la masse volumique.

Quant aux instruments de mesure, ils sont de deux types : ceux qui perturbent l'écoulement de fluide par leur présence physique, et ceux qui n'apportent aucune perturbation. Ainsi, si l'on plonge un thermomètre à mercure dans un écoulement de fluide, ce dernier doit modifier sa trajectoire et contourner le thermomètre : à faible vitesse d'écoulement, cette perturbation est négligeable ; mais avec des gaz à grande vitesse, se déplaçant au-delà du « mur du son », il se formera une onde de choc devant le thermomètre qui modifiera complètement la nature de l'écoulement ; la perturbation sera, alors loin d'être négligeable.

L'emploi du laser, pour réaliser une étude d'écoulement de fluide, est particulièrement intéressant : le faisceau laser est immatériel, et, le plus souvent il n'engendre aucun phénomène perturbateur. Si l'énergie du laser est trop

grande, on assistera, cependant, à une ionisation (dans le cas d'un écoulement gazeux) ou à un fort échauffement (écoulement liquide) ; l'un ou l'autre de ces deux phénomènes perturbera les mesures susceptibles d'être réalisées avec le laser.

Souvent, on utilise un laser de faible puissance (laser à hélium-néon) qui ne perturbera pas les mesures.

DES ECOULEMENTS TURBULENTS OU LAMINAIRES

Un écoulement liquide peut être turbulent ou laminaire selon que le produit de la vitesse par une longueur caractéristique est supérieure, ou non, à un certain seuil (fig. 1).

Il en va de même des écoulements gazeux. Cependant la situation se complique, car le produit vitesse x longueur caractéristique ne suffit pas pour définir le régime de l'écoulement : la masse volumique, et la viscosité du gaz sont à prendre en considération également. On définit un paramètre caractéristique, dénommé « nombre de Reynolds », qui se trouve être le produit de la masse volumique par la vitesse du fluide et par une longueur caractéristique de l'écoulement, le tout divisé par la viscosité dynamique du gaz (fig. 2).

L'écoulement gazeux est laminaire aux faibles nombres de Reynolds (inférieurs à 2 500) ; aux

nombres de Reynolds élevés, il devient turbulent.

Pour un liquide, on utilise également le nombre de Reynolds, qui est proportionnel au produit vitesse x longueur caractéristique. Aux faibles valeurs du nombre de Reynolds, un écoulement liquide sera laminaire, et deviendra turbulent aux plus grandes valeurs de ce nombre.

Dans la pratique, le nombre de Reynolds est souvent grand dans les écoulements gazeux, pour lesquels la viscosité est faible (le nombre de Reynolds est inversement proportionnel à la viscosité), et pour lesquels on atteint des vitesses d'écoulement importantes. Ainsi, il n'est pas rare d'obtenir des nombres de Reynolds supérieures au million sur un avion. Les écoulements gazeux sont souvent turbulents.

Il n'en va pas de même pour les liquides ; la viscosité dynamique est plus élevée et les vitesses considérées sont faibles. Les nombres de Reynolds peuvent ainsi être de l'ordre de la centaine et les écoulements liquides être ainsi laminaires.

Dans un écoulement turbulent, les fluides se trouvent fortement mélangés, brassés ; les transferts thermiques sont plus rapides qu'en régime laminaire et cet effet peut être mis à profit dans des circuits de chauffage ou de refroidissement. Dans d'autres cas, la turbulence est indésirable car elle est la cause de pertes d'énergie.

Il est donc important de pouvoir mesurer la structure fine

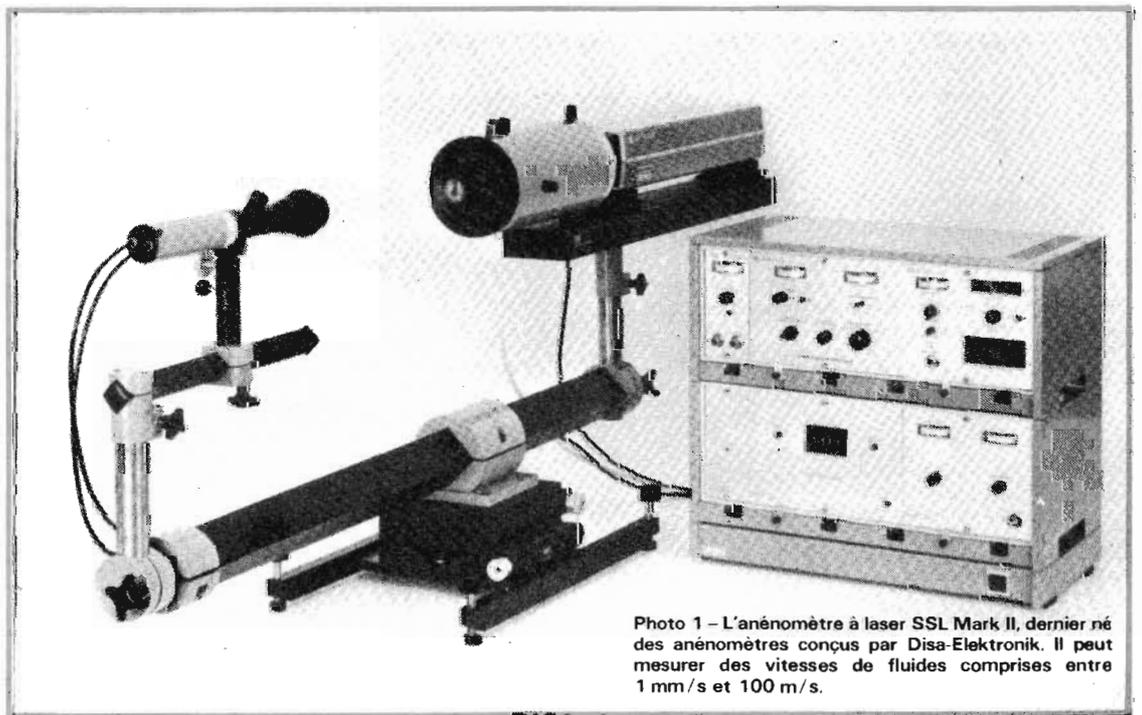


Photo 1 - L'anémomètre à laser SSL Mark II, dernier né des anémomètres conçus par Disa-Elektronik. Il peut mesurer des vitesses de fluides comprises entre 1 mm/s et 100 m/s.

d'un écoulement turbulent. Les calculs théoriques ne sont pas aisés et ils s'appuient souvent sur des résultats empiriques. L'élément sensible que l'on doit utiliser pour ce type de mesures doit être de très petites dimensions (pour que les mesures soient fines), son temps de réponse doit être court, et sa sensibilité suffisamment élevée; en outre il est important que cet élément n'ait qu'une influence perturbatrice limitée sur l'écoulement original. L'instrument utilisé habituellement est l'anémomètre à fil, ou à film chaud: l'élément sensible est soit un fil mince suspendu entre les deux branches d'une fourche, ou un mince film métallique déposé sur un support en quartz.

Une sonde à fil chaud a une longueur de fil voisine du millimètre; on peut remplacer l'anémomètre à fil chaud par un anémomètre à laser: le volume analysé par cet appareil a un diamètre de l'ordre de 50 microns. La résolution spatiale est donc considérablement améliorée grâce au laser; de plus, la mesure des vitesses de l'écoulement s'effectue sans perturbation extérieure.

La méthode du fil chaud est fondée sur la mesure de la variation d'une résistance en fonction

de la température; la sonde, nécessairement de petites dimensions pour assurer la ponctualité de la mesure, est très fragile. Enfin, l'étalonnage de ce type d'appareil n'est pas stable: il dépend, en particulier de la température et de la pureté du fluide.

L'EFFET DOPPLER EST MIS EN ŒUVRE

Le laser possède trois propriétés particulières: il émet un faisceau monochromatique et de très faible divergence; enfin, il est possible de concentrer une énergie importante dans de faibles volumes.

Ces qualités peuvent être mises à profit pour mesurer, par effet Doppler, la vitesse d'un écoulement, en analysant la lumière diffusée par les particules en suspension dans le fluide en mouvement. Les particules sont éclairées par le faisceau laser; l'effet Doppler se traduit par un décalage de la fréquence de l'onde diffusée, par rapport à l'incidence de l'onde optique incidente.

Pour mettre en évidence les faibles différences de fréquence entre les ondes incidentes et diffusées, il faut disposer d'une source monochromatique; c'est,

en effet, la largeur de raie de la radiation incidente qui fixera la plus faible différence entre ondes incidentes et diffusées. D'autre part, pour que la mesure soit ponctuelle, la source doit émettre un faisceau quasiment non-divergent. Enfin, pour que la mesure soit possible, l'intensité lumineuse doit être suffisante et l'on doit pouvoir concentrer une énergie importante au point de mesure. Ces qualités requises caractérisent justement les lasers.

Le premier montage susceptible d'être utilisé, consiste à mélanger l'onde diffusée dans une direction donnée, à l'onde incidente, sur le photo-détecteur lui-même (fig. 5). Il présente l'inconvénient d'être très sensible aux vibrations et aux mésalignements.

Dans un second montage, souvent employé, on crée, à partir d'une source laser, deux faisceaux indépendants qui se croisent au point de mesure: le photo-détecteur est placé soit sur l'un ou l'autre des trajets, soit entre les deux trajets. Dans le premier cas, l'alignement est automatiquement réalisé puisque le récepteur reçoit un faisceau direct; dans le second cas, la fréquence de battement ne dépend

plus de la position du photo-détecteur entre les deux faisceaux. Ces méthodes présentent donc l'avantage de ne nécessiter aucun effort particulier d'alignement lors de la réalisation du montage (fig. 6).

Plusieurs variantes du montage à deux faisceaux laser sont ainsi utilisées, selon la position du photo-détecteur.

Le laser employé est un laser à hélium-néon fonctionnant à 0,6328 micron de longueur d'onde, et sa puissance est de quelques milliwatts.

La forme d'un signal Doppler idéal est celle d'une sinusoïde dont la fréquence est liée à la vitesse instantanée du fluide (ou plutôt la projection de cette vitesse sur une direction qui dépend de la direction d'observation). Le traitement du signal doit être étudié de manière très soignée, afin d'éliminer, en particulier les signaux parasites dus au bruit propre au laser, au bruit venant du photo-multiplieur ou encore au bruit provenant des particules qui traversent le faisceau laser tout au long de son trajet dans le fluide; ce dernier bruit peut devenir important pour de grandes épaisseurs de fluide à traverser.

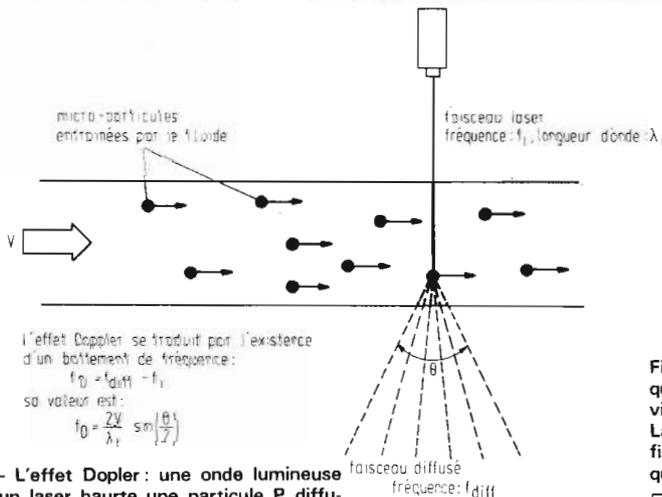


Fig. 3. - L'effet Doppler: une onde lumineuse issue d'un laser heurte une particule P diffusante, en suspension dans un fluide animé d'une vitesse V. La fréquence de la lumière diffusée est légèrement différente de la fréquence du faisceau incident.

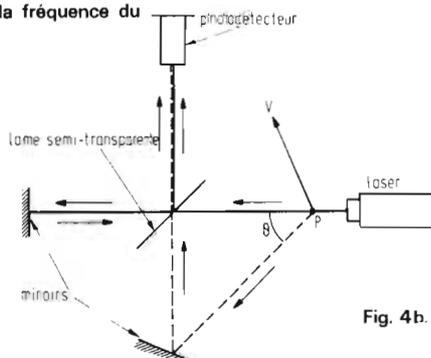


Fig. 5. - Anémomètre simple: l'efficacité du mélange optique sur le photodétecteur dépend du parallélisme des fronts d'onde qui atteignent celui-ci; le montage est très sensible aux mésalignements et aux vibrations.

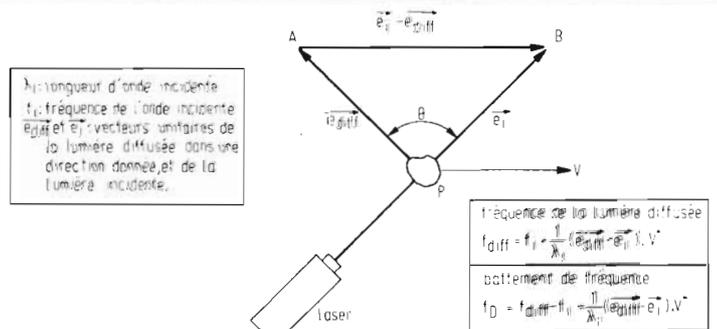
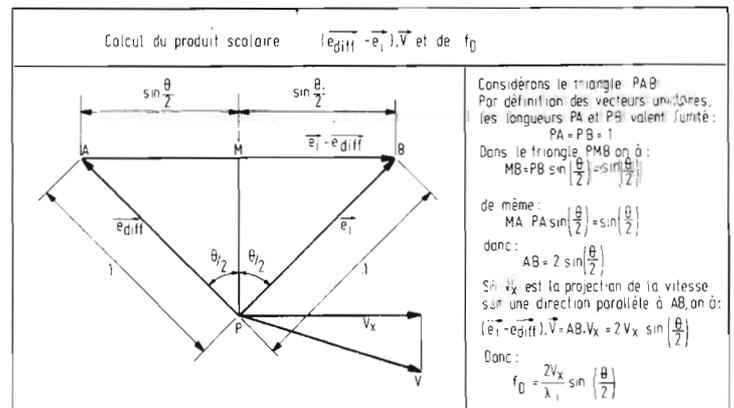
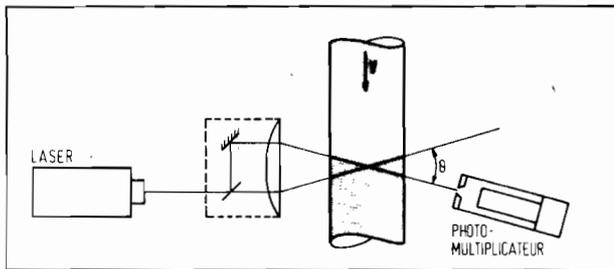
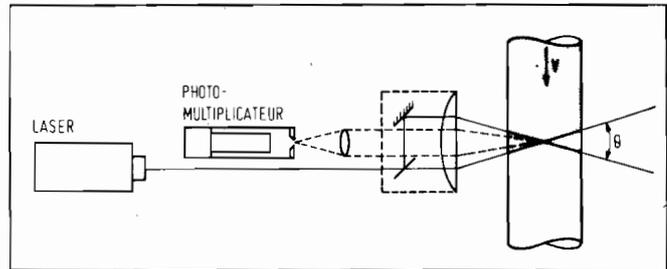


Fig. 4. - Une démonstration: Considérons une onde lumineuse émise par un laser qui heurte une particule P, diffusante, en suspension dans un fluide animé d'une vitesse V. La lumière diffusée par cette particule a une fréquence différente de la fréquence f_i incidente. Le mélange des ondes incidentes et diffusées donne un battement de fréquence F_D.

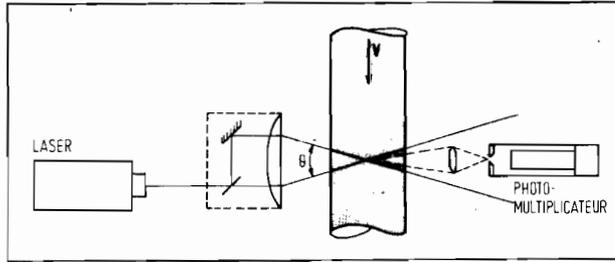




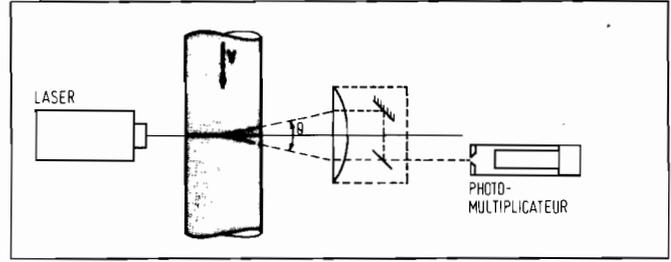
(a) Méthode du faisceau de référence.



(b) Méthode Doppler différentielle avec lumière diffusée vers l'arrière.



(c) Méthode Doppler différentielle avec lumière diffusée vers l'avant.



(d) Méthode à deux faisceaux diffusés vers l'avant.

Fig. 6. - Quatre méthodes de mesure à deux faisceaux.

Divers appareillages ont été réalisés et certains sont commercialisés, tels que l'anémomètre à laser type SSL de DISA ; cet anémomètre a été développé en collaboration avec l'United Kingdom Atomic Energy Authority, équivalent britannique de notre commissariat à l'Énergie atomique.

Un prototype d'anémomètre à laser a été conçu au centre d'études et de recherches de l'E.D.F. pour les besoins du laboratoire national d'hydraulique. Il offre une gamme de mesures s'étendant de quelques dixièmes de mm/s à 10 m/s environ. La comparaison de signaux obtenus par l'anémomètre, avec ceux de films chauds (sonde Disa 55A87) montre que le dispositif à laser a un temps de réponse plus bref que le film chaud.

Dans de nombreuses applications, il est important de mesurer au même point, et au même instant, deux composantes perpendiculaires de la vitesse du fluide. À partir d'un seul laser, on peut créer quatre faisceaux qui convergent au point de mesure ; les faisceaux ont des polarisations croisées deux à deux : cette discrimination par polarisation est nécessaire pour assurer l'indépendance des mesures selon deux axes perpendiculaires. Deux détecteurs reliés chacun à une chaîne de mesure permettent de mesurer simultanément les deux composantes de vitesse du fluide.

Dans certaines applications la mesure du sens de propagation (et non uniquement la valeur absolue

de la vitesse) peut avoir de l'intérêt : c'est le cas lors de l'étude de la houle. Pour discriminer le sens de l'écoulement, les chercheurs de l'E.D.F. ont produit un « faux zéro » de l'appareil : en l'absence d'écoulement, l'appareil fournit une réponse en fréquence, non nulle ; dans ces conditions, le signal correspondant à un écoulement sera caractérisé par une fréquence qui s'ajoutera ou se retranchera au faux zéro, selon son sens.

L'ANENOMETRE EN SOUFFLERIE...

De nombreux laboratoires d'aérodynamique ont adopté l'anémomètre à laser pour la mesure de la vitesse de l'air dans les souffleries, autour de maquettes simulant hélicoptères, avions, fusées ou autres engins aériens.

Ainsi, à l'Arnold Air Force Station, la source employée est un laser à argon délivrant 0,7 W à la longueur d'onde de 0,4880 micron. Souvent, en anémométrie par laser, il faut ensemercer artificiellement l'écoulement fluide pour que la mesure soit réalisable ; les essais, à l'Arnold Air Force Station, ont été menés sans ensemercement de l'écoulement ; cette méthode a été rendue possible grâce à la forte puissance optique délivrée par le laser. Des essais ont été effectués autour d'ailes portantes, placées en écoulement subsonique ; ces ailes reproduisaient les ailes d'avions à

décollage court. Les résultats obtenus avec l'anémomètre à laser ont été comparés à des résultats déduits de mesures de pression : ces deux types de résultats se sont avérés être en bonne concordance sauf au bord d'attaque des profils où la vitesse du fluide change brusquement de direction : un léger mésalignement dans le montage conduit alors, dans l'investigation du bord d'attaque, à d'importantes erreurs sur la mesure des vitesses.

L'écoulement turbulent a fait l'objet de nombreuses investigations expérimentales. Par exemple, à l'« Ames Research Center » de la NASA, Dennis A. Johnson et William C. Rose ont choisi d'analyser le comportement des « couches limites » turbulentes dans les écoulements supersoniques (fig. 7), à des nombres de Mach voisins de 2,9. Les mesures de vitesse, en anémométrie par laser deviennent peu aisées aux grandes vitesses d'écoulement : en effet, les signaux recueillis ont des fréquences élevées ce qui nécessite l'emploi de circuits électroniques à plus large bande passante ; en outre, pour que l'intensité des signaux soit suffisante, il convient d'ensemencer l'écoulement de fines particules diffusantes ; la finesse des particules doit être suffisamment grande pour qu'elles se déplacent à la même vitesse que le fluide gazeux. Le montage expérimental paraît donc peu aisé à réaliser, ce qui explique la faible quantité de

publications scientifiques relatives à l'anémométrie à laser en supersonique.

D. A. Johnson et W.C. Rose ont effectué de nombreuses mesures (jusqu'à 6 000 de vitesse instantanée dans la couche limite turbulente ; ils en ont déduit des paramètres spécifiques de la turbulence au moyen de lois statistiques. Les mesures, ici aussi, donnent des résultats similaires à ceux obtenus par les moyens classiques (anémomètre à fil chaud).

Les mêmes chercheurs ont poursuivi leurs investigations en supersonique par l'interaction d'ondes de choc avec des couches limites turbulentes. Lorsqu'un obstacle est placé dans un écoulement supersonique, il se forme une onde de choc devant le bord d'attaque : à la traversée de ce choc, tous les paramètres aérodynamiques du fluide (pression, température, vitesse, masse volumique) varient brutalement. L'onde de choc s'étend assez loin aux environs de l'obstacle. Cette onde peut rencontrer un autre obstacle, sur lequel se développe une couche limite : l'interaction onde de choc - couche limite engendre une modification du profil de la couche limite, et, donc, des variations des transferts thermiques et des effets visqueux derrière la zone où se produit cette interaction. De tels phénomènes peuvent simuler ce qui se passe à l'entrée d'une prise d'air, à l'entrée des moteurs d'un avion supersonique par exemple : la prise d'air se présente en effet

définitions:
 nombre de Reynolds:
 $Re = \frac{\rho U_e x}{\mu}$
 avec: ρ : masse volumique locale du gaz
 et μ : viscosité.

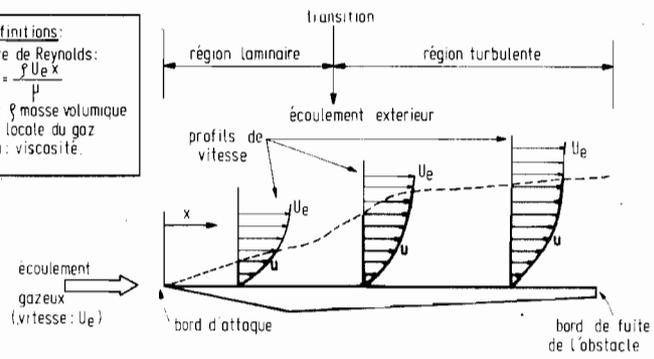


Fig. 7 - La couche limite.

Considérons un obstacle solide fixe placé dans un écoulement de gaz. A la paroi de l'obstacle, le fluide a une vitesse nulle, mais celle-ci augmente en s'éloignant de l'obstacle. A une certaine distance de la paroi, la vitesse ne varie plus.

La région proche de la paroi, où la vitesse varie est dénommée « la couche limite ». C'est dans cette couche que se produisent les transferts de chaleur entre l'écoulement et l'obstacle ; la couche limite est aussi responsable d'effets visqueux, tels que l'échauffement de l'obstacle dû au frottement du gaz sur les parois.

La couche limite est laminaire à proximité du bord d'attaque ; elle devient turbulente lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à un seuil (environ 3 000). Les effets de la couche limite (effets visqueux, transferts thermiques) sont fortement influencés par la nature laminaire ou turbulente de celle-ci : d'où l'importance des études sur le comportement de la couche limite.

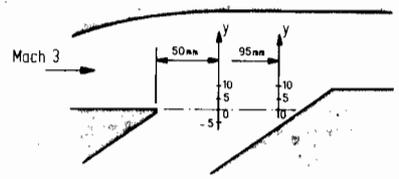
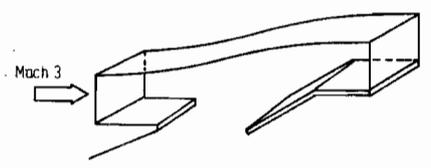


Fig. 9 - Les mesures par anémomètre à laser, effectuées à l'O.N.E.R.A. ont été réalisées dans un écoulement turbulent à l'aval d'une marche.

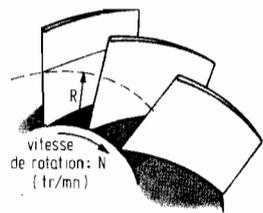
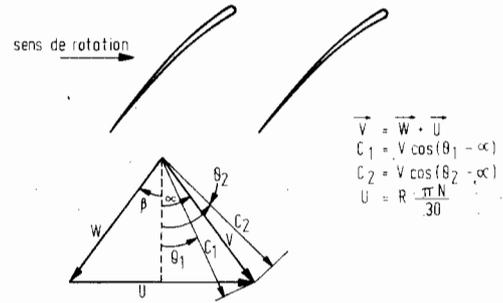


Fig. 10 - Dans le rotor d'une turbomachine... Dans le rotor d'une turbomachine, l'écoulement résulte de deux effets : d'une part, la variation de pression entre l'amont et l'aval d'un aubage génère un mouvement relatif, caractérisé, localement par une vitesse relative W de l'écoulement ; d'autre part, le rotor tourne et entraîne, avec une vitesse U, le fluide. La vitesse réelle V de l'écoulement résulte de la composition vectorielle de la vitesse relative W et de la vitesse d'entraînement U. Par anémométrie à laser, on mesure deux projections c1 et c2 de la vitesse réelle V suivant deux directions : ces deux mesures permettent de déterminer la vitesse réelle, en grandeur et en direction.

La mesure s'effectue au rayon R. La connaissance de la vitesse de rotation du rotor permet de calculer la vitesse d'entraînement U au rayon R.

A partir de V et de U, on peut déduire la vitesse relative W par des relations géométriques dans les triangles, le « triangle de vitesses est ainsi reconstitué ; il permet d'évaluer les grandeurs thermodynamiques locales (pression, température, masse volumique du gaz)

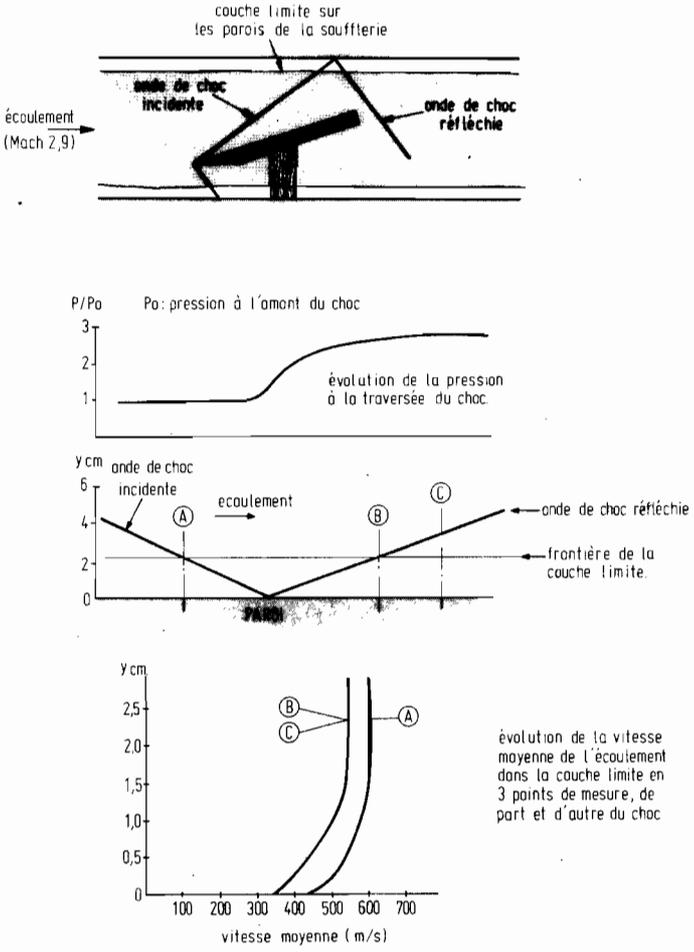


Fig. 8 - L'interaction choc, couche limite turbulente. Des mesures fines par anémomètre à laser ont été effectuées par W.C. Rose et D.A. Hohnson, voici quelques mois.

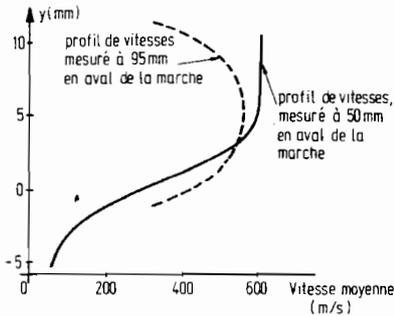
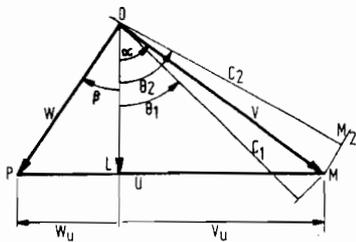


Fig. 11 - Comment on calcule un triangle de vitesse ?

L'anémomètre à laser permet de connaître $OM_1 = C_1$, $OM_2 = C_2$, ainsi que les angles θ_1 et θ_2 . On a :

$$\begin{aligned} C_1 &= V \cos(\theta_1 - \alpha) \quad (1) \\ C_2 &= V \cos(\theta_2 - \alpha) \quad (2) \end{aligned}$$

Il vient donc :

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\cos(\theta_1 - \alpha)}{\cos(\theta_2 - \alpha)}$$

d'où :

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \alpha + \sin \theta_1 \sin \alpha}{\cos \theta_2 \cos \alpha + \sin \theta_2 \sin \alpha}$$

et :

$$C_2 (\cos \theta_2 \cos \alpha + \sin \theta_2 \sin \alpha) = C_1 (\cos \theta_1 \cos \alpha + \sin \theta_1 \sin \alpha)$$

soit :

$$(C_1 \cos \theta_2 - C_2 \cos \theta_1) \cos \alpha = (C_2 \sin \theta_1 - C_1 \sin \theta_2) \sin \alpha$$

Et, finalement :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_1 \cos \theta_2 - C_2 \cos \theta_1}{C_2 \sin \theta_1 - C_1 \sin \theta_2} \quad (3)$$

$C_1, C_2, \theta_1, \theta_2$ sont mesurés. La relation (3) permet de calculer $\operatorname{tg} \alpha$, donc α . On en déduit la vitesse V au moyen de l'une ou l'autre des relations (1) et (2).

Posons $OL = OM \cos \alpha = V \cos \alpha$.

Appelons V_u et W_u les projections de V et de β sur la direction PM .

On a : $V_u = V \sin \alpha$.

D'autre part : $U = R \pi N / 30$, où N est la vitesse de rotation du rotor exprimée en tours par minute.

Il vient $W_u = V_u - U = V \sin \alpha - U = PL$.

On en déduit, d'après le théorème de Pythagore, dans le triangle rectangle PLO :

$$W = \sqrt{OL^2 + PL^2}$$

$$\text{soit } W = \sqrt{(V \cos \alpha)^2 + (V \sin \alpha - U)^2}$$

$$\text{et } \operatorname{tg} \beta = \frac{PL}{OL} = \frac{V \sin \alpha - U}{V \cos \alpha}$$

sous forme d'un cône, qui génère en vol supersonique, une onde de choc ; celle-ci se propage et va frapper la carène située légèrement à l'arrière. Pour connaître le comportement aérodynamique des prises d'air, il faut disposer d'investigations expérimentales à échelle réduite, en soufflerie aérodynamique (fig. 8). L'outil d'investigation peut, ici encore, être le laser à hélium-néon, associé à l'instrumentation conventionnelle (tube de Pitot et anémomètre à fil chaud).

Des travaux similaires sont menés en France dans les laboratoires d'aérodynamique, et en particulier à l'O.N.E.R.A. Des mesures par anémomètre à laser y ont été effectuées par A. Boutier, dans une soufflerie fonctionnant à mach 3, d'une part avec un laser à hélium-néon de 25 milliwatts et d'autre part avec un laser à argon émettant 2 W à la longueur d'onde de 0,5145 micron ; ce dernier laser permet d'éviter d'ensemencer l'écoulement avec des particules diffusantes ; seules les particules de poussière contenues naturellement dans l'atmosphère sont utilisées dans les mesures d'anémométrie par effet Doppler. L'investigation a porté sur un écoulement supersonique hautement turbulent, généré par une marche, dans la soufflerie 58 B du centre de recherches de Chalais-Meudon.

... ET POUR L'INVESTIGATION DES TURBOMACHINES

L'investigation expérimentale des turbomachines (turbine à gaz,

compresseur) est extrêmement compliqué : on n'a guère accès au canal qu'emprunte le fluide, puisque ce canal tourne. Une turbomachine est en effet un appareil dans lequel l'on transforme de l'énergie cinétique de rotation en énergie de pression (c'est le compresseur) ou au contraire de l'énergie de pression en énergie cinétique (c'est la turbine). Cette transformation s'effectue dans des séries d'aubages fixes (stator) et mobiles (rotor). Le stator d'un compresseur a pour rôle soit de ralentir le fluide et de transformer l'énergie cinétique du fluide (qui lui est conférée dans le rotor) en énergie potentielle (pression) ; dans une turbine, le stator sert à accélérer le fluide (comme une tuyère) et à la présenter convenablement au rotor.

Il est quasiment impossible de connaître expérimentalement la nature de l'écoulement dans un rotor : comment insérer, en effet, un capteur dans un ensemble tournant souvent à grande vitesse (plusieurs milliers de tours par minute). Par contre, l'anémomètre à laser est un instrument qui ne requiert aucun contact mécanique et il peut donc être utilisé pour l'étude des écoulements tournants. Une telle utilisation a été envisagée chez General Electric par D.C. Wisler et P.W. Mossey ; l'anémomètre à laser a servi à la mesure de vitesses dans un compresseur de recherche tournant nant à faible régime (590 t/mn), il a été fait appel à un laser à argon émettant des impulsions optiques (longueur d'onde de 0,5145 micron) de puissance crête atteignant 6 W ; la durée des

impulsions était de 25 microsecondes. Les particules diffusantes ensemencées furent des grains de polystyrène de diamètre égal au micron : elles suivent quasiment l'écoulement ; en effet, avec des vitesses réelles du flux comprises entre 15 et 25 m/s, les particules paraissent subir un très léger glissement (de l'ordre de 0,03 m/s).

Un compresseur industriel

tourne souvent beaucoup plus vite que le compresseur expérimental précédent (on dépasse souvent 10 000 t/mn). Peut-on envisager d'adapter l'anémomètre à laser à ce type de turbomachine et, pourquoi pas ? aux turbines... l'industrie n'a pas encore fourni de réponse précise.

Marc FERRETTI

ON LIRA AVEC INTÉRÊT :

- « Progrès permis par l'anémomètre à laser dans la mesure des écoulements » par B. Hansen - Mesures, janvier-février 1972.
- « Vélocimètre à laser » par B. Dessus, P. Napie et L. Perneker - La Houille blanche, n° 8, 1972.
- « The Designer and applications of a non-contact velocimeter used in processus control » par R.J. Smith-Saville - Conférence présentée lors d'Eurocon 74 (mai 1974).
- « Application of dual scatter laser Doppler velocimeters for wind tunnel measurements » par A.E. Lennert, F.H. Smith, R.L. Parker - Rapport de l'Arnolds Air Force Station (Tennessee, USA).
- « Measurement of turbulence transport properties in a supersonic boundary-layer flow using laser velocimeter and towire anemometer techniques » par D.A. Johnson et W.C. Rose - Communication présentée lors de « l'AIAA Aero-Acoustics Conference » (Washington, oct. 1973).
- « A study of shock-wave turbulent boundary-layer interaction usign laser velocimeter and hot-wire anemometer technique » par W.C. Rose et D.A. Johnson - Communication présentée lors de « l'AIAA 12th Aerospace Sciences Meeting » (Washington, fev. 1974).
- « Laser velocimeter mean and fluctuation velocity measurement of a mach 2,9 wind-tunnel turbulent boundary-layer » par D.A. Johnson.
- « Laser Anemometry in a highly turbulent supersonic flow » par A. Boutier - Communication présentée à la réunion de travail sur l'anémomètre laser dans le cadre du projet Squid (Lafayette, USA)
- « Ges velocity measurements within a compressor rotor passage using a laser Doppler velocimeter » par D.C. Wisler et P.W. Mossey - ASME paper 72-WA/GT-2.