

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 126 (2000)  
**Heft:** 03

**Artikel:** Visualisation d'écoulements: nouveaux moyens pour l'industrie  
**Autor:** Prenel, Jean-Pierre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-81477>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Visualisation d'écoulements: nouveaux moyens pour l'industrie

( NOUVELLES TECHNOLOGIES )

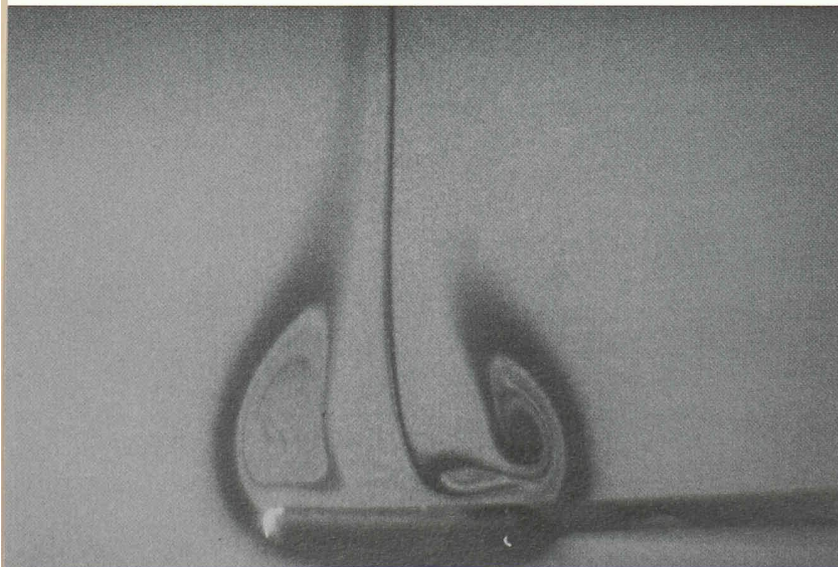
La mise en évidence visuelle de phénomènes, si elle n'est pas récente, reste un atout, dans le domaine scientifique comme dans le domaine industriel, malgré l'utilisation toujours plus poussée de la simulation numérique. En plus de la visualisation de l'écoulement, de ses tourbillons et de ses ondes de chocs, les méthodes actuelles évoluent vers des mesures quantitatives : mesure de vitesse popularisée par le développement de lasers à double impulsion, mesures de variation de la température ou de l'indice de réfraction, ou même de variation de phase, dans le liquide ou le gaz. Avec des capteurs plus précis, des sources de lumières plus puissantes, les moyens d'observation gagnent en précision et en convivialité. Grâce à la tomographie laser, à l'interférométrie, à l'holographie ou à d'autres méthodes encore, l'industrie dispose d'outils d'analyse dans des domaines aussi divers que les systèmes de climatisation, l'aérodynamique, le refroidissement de procédés thermiques et électriques et les études en soufflerie pour le génie civil. Un survol de différentes méthodes est présenté dans cet article.

## Pourquoi utiliser le laser?

L'idée d'utiliser la lumière afin d'obtenir une information qualitative sur les mouvements des fluides n'est pas neuve: on attribue généralement à Léonard de Vinci (1452 - 1519), la « découverte » de la visualisation des écoulements. Parmi les innombrables centres d'intérêt de cet éclectique inventeur, la mécanique des fluides figurait en bonne place: l'hydraulique (irrigation, navigation, érosion) comme l'aérodynamique (vol des oiseaux, mouvements atmosphériques) sont à l'origine de nombreuses expérimentations présentées dans ses écrits et l'on trouve notamment dans ses dessins le principe des traceurs entraînés par les écoulements (fumées, grains de millet ou colorants) qui permettent l'observation visuelle des phénomènes.

A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, Reynolds publie les premiers résultats quantitatifs issus d'une visualisation par colorants: l'analyse de la transition entre écoulements laminaires et turbulents, observée dans un fluide incompressible, reste l'une des plus célèbres expériences de la mécanique des fluides.

Un point commun à ces deux familles d'expériences est l'utilisation de la lumière comme « capteur » non perturbant. S'il est pour une bonne part à l'origine du succès de ces méthodes optiques, ce caractère non intrusif est toutefois tempéré par l'intrusion que constitue l'ajout de corps étrangers dans l'écoulement. Heureusement pour le physicien ou l'ingénieur, la perturbation apportée par les traceurs est toujours faible, voire négligeable, si l'on prend les précautions d'usage lors du choix des traceurs (petite taille, faible concentration, adaptation de la masse volumique). Tout au plus, si l'on n'y prend pas garde, peut-on apporter un peu d'énergie parasite sous forme thermique. Une fois identifié cet avantage classique de l'optique, subsiste généralement le problème de l'observation des traceurs: par principe de taille réduite, ceux-ci sont difficiles à voir et leurs images malaisées à enregistrer. Les phénomènes optiques à l'origine de ces obstacles sont bien connus: réflexion sur les interfaces, éventuellement réfraction pour des traceurs sous forme de gouttelettes, mais aussi diffraction et surtout diffusion en raison des faibles dimensions en jeu; dans le langage des spécialistes, on parle d'ailleurs de visualisation par diffusion. La faible lumière diffusée constitue donc un problème récurrent pour ce type de



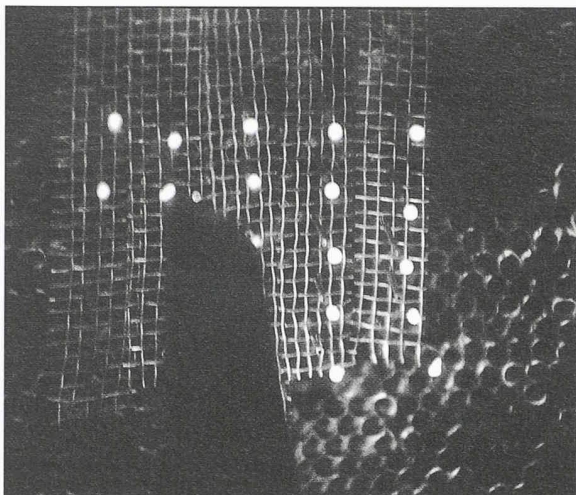


Fig. 1 : Visualisation d'écoulements de convection à partir de la mesure des gradients de température

Fig. 2 : Matrice d'injecteurs pour l'ensemencement en différents points

(Photos: IGE, Belfort)

méthodes. Une réponse a vu le jour au cours des années 1970: le développement des lasers, sources de lumière intenses et directives, a permis d'accroître considérablement la densité de puissance des éclairages, si bien que tout en conservant des traceurs microniques, voire submicroniques de nouvelles méthodes sont apparues qui tirent parti de l'augmentation sensible des quantités de lumière diffusée.

#### Expérimentation contre modélisation numérique: un débat inutile !

A l'ère de l'informatique omniprésente, on constate que « le calcul est roi » et que la mécanique des fluides n'a pas échappé à l'évolution spectaculaire des modèles numériques et des moyens de traitement. Aussi, dès 1975, les théoriciens les plus optimistes prévoient-ils la disparition des expérimentations avant la fin de la décennie. Cette prédiction ne s'est pourtant pas complètement vérifiée. Aujourd'hui, un langage plus modéré est de mise: l'expérience reste encore souvent le complément indispensable de la simulation. De même que les constructeurs automobiles « cassent » encore des voitures pour caler leurs modèles de déformation sous les chocs, les aérodynamiciens, même au plus haut niveau (formule 1, aéronautique), placent encore des maquettes dans des souffleries pour affiner leurs modèles d'écoulements. Parmi les méthodes expérimentales utilisées, l'analyse optique s'est imposée au fil des années comme complémentaire des techniques classiques de mesure des efforts mécaniques (traînée, portance) essentiellement en raison du caractère non intrusif évoqué précédemment, mais également parce que la mise en évidence visuelle des phénomènes reste toujours un atout, dans le domaine scientifique comme dans le domaine industriel.

#### L'analyse optique, méthode qualitative ou quantitative ?

Autre débat stérile qui agite encore certains spécialistes: les méthodes optiques conduisant à une visualisation sont-elles purement qualitatives ou peuvent-elles accéder au rang de méthodes de mesure? La réponse est pourtant simple, comme souvent lorsqu'il s'agit de « querelles d'écoles ».

- Certaines méthodes sont purement qualitatives et ne don-

nent qu'une information visuelle sur le phénomène: écoulements laminaires ou turbulents, présence de décollements, de tourbillons ou de recirculations... Toutefois, celles-ci peuvent être corrélées avec des mesures classiques obtenues sur l'écoulement lui-même par d'autres moyens (vitesse, débit); il s'agit là d'ailleurs de l'approche historique de Reynolds.

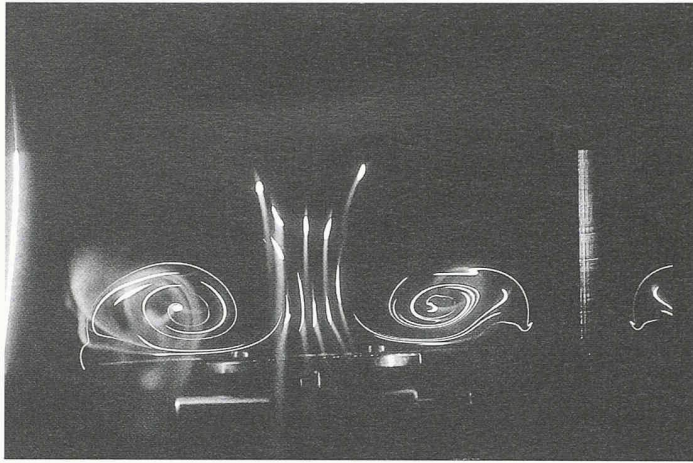
- L'observation du phénomène peut également conduire à une mesure directe sur l'image d'un paramètre géométrique caractéristique de l'écoulement: position du cœur d'un tourbillon, position d'une onde de choc... Dans ce cas, la simple visualisation devient quantitative. Le formidable essor des méthodes de traitement des images au cours de la dernière décennie a d'ailleurs largement favorisé cette promotion de la visualisation. De plus, le remplacement progressif des émulsions photosensibles par des capteurs photoélectriques, aujourd'hui le plus souvent de type CCD, a permis de généraliser le passage d'une analyse statique à une analyse dynamique: évolution dans le temps d'un tourbillon ou de toute autre structure cohérente.

- La grandeur physique la plus « recherchée » en mécanique des fluides demeurant toutefois la vitesse, visualisation et vélocimétrie ont souvent été dissociées, voire opposées. En fait, les deux concepts sont souvent inséparables et les physiciens n'ont d'ailleurs pas attendu l'invention du laser pour mesurer des vitesses par imagerie: la plupart d'entre nous gardent en mémoire la mesure de la vitesse de chute d'un corps pesant par chronophotographie (mesure de la distance parcourue pendant un intervalle de temps connu séparant deux éclairs de lumière). Le même principe appliqué au suivi d'un traceur dans un écoulement conduit bien à la mesure de la vitesse: c'est la vélocimétrie par imagerie, « popularisée » récemment par le développement des lasers à double impulsion.

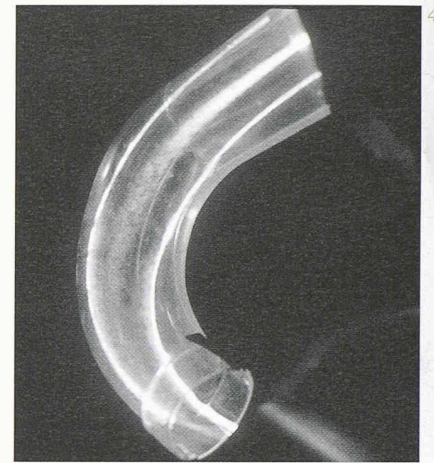
#### Méthodes intégrantes et méthodes tomographiques

Une autre voie historique empruntée par les physiciens pour extraire de l'information d'un fluide transparent est celle de la conversion des variations de température ou de pression en variations de l'indice de réfraction; c'est l'approche de Toepler (1864), rendue célèbre dans les décennies suivantes par les travaux de Mach sur la visualisation des ondes de choc.

Aujourd'hui, on peut distinguer deux familles de méthodes exploitant les variations ( $Dn$ ) de l'indice de réfraction d'un fluide, lesquelles diffèrent par le principe de mise en évidence de  $Dn$ :



3



4

- l'ombroscopie et la strioscopie transforment  $Dn$  en déviations de rayons lumineux; c'est la classique réfraction dans les milieux transparents,
- l'interférométrie et l'holographie transforment  $Dn$  en variations de phase, en exploitant en priorité le changement de la vitesse de propagation de la lumière.

Un point demeure cependant commun à ces méthodes: elles donnent de tout écoulement tridimensionnel, une projection bidimensionnelle. Intégrant les phénomènes suivant la direction de propagation de la lumière d'éclairage, elles rendent donc délicate, voire impossible, toute analyse réellement tridimensionnelle, une difficulté que seule l'holographie peut permettre de contourner.

C'est ce défaut, parfois rédhibitoire, qui a amené les opticiens, dans les années 1970, à proposer des méthodes d'analyse tomographiques, qui font appel à un éclairage constitué de minces nappes de lumière laser (on dit souvent « plan laser » par simplification). Ce principe donne accès à la visualisation de différentes sections planes d'un écoulement tridimensionnel ensemencé par des traceurs.

#### Méthodes locales et méthodes globales

Dans toute méthode utilisant l'imagerie, la lumière diffusée par les traceurs est enregistrée sur un support photosensible argentique ou photoélectrique. Une question souvent posée par les utilisateurs potentiels est la suivante: si les traceurs sont microscopiques afin de conserver l'aspect non intrusif, comment peut-on les « voir ». Pas de miracle dans ce domaine:

- si l'on veut individualiser les traceurs et en observer une image, il faut respecter les lois élémentaires de l'optique: choisir une dimension de traceur observable pas trop proche de la longueur d'onde, augmenter le grandissement du système d'observation, donc réduire le champ (échelle du  $\text{cm}^2$  au  $\text{dm}^2$ ); toutes les méthodes de type chronophotographie ou trajectrographie sont soumises à ces contraintes;
- si l'on observe à distance élevée un large champ (échelle du  $\text{m}^2$ ), le plus souvent la visualisation révèle un comportement global des traceurs, considérés alors comme un milieu quasi-continu de type « nuage ». On met ainsi en

évidence des structures cohérentes (tourbillons), des gradients élevés (ondes de choc) ou des zones de mélange (turbulences).

#### Aspect temps-fréquence de la lumière diffusée

Une tout autre approche consiste à abandonner totalement l'idée d'une imagerie afin d'exploiter d'autres propriétés de la lumière diffusée par les traceurs. Le changement de fréquence d'une onde diffusée par un corps en mouvement est bien connu des physiciens (même des lycéens en principe). A cet effet est associé le plus souvent le nom de Doppler qui a traité le cas des ondes acoustiques (1843); en fait, c'est Fizeau qui l'a appliqué aux rayonnements lumineux en 1848. Un traceur en mouvement éclairé par une longueur d'onde bien identifiée (laser) diffuse donc une lumière dont la longueur d'onde « décalée » est représentative de sa vitesse. De cette idée, est née la vélocimétrie laser Doppler (on devrait dire Doppler-Fizeau).

Le décalage « Doppler » de la longueur d'onde étant très faible pour les vitesses usuelles de la Mécanique des fluides, il s'est avéré rapidement que sa mesure était complexe et incertaine. La variante pratique retenue pour exploiter ce principe, consiste donc à concentrer dans un petit volume [échelle  $10^3(\mu\text{m})^3$ ] deux ondes cohérentes issues d'un même laser qui interfèrent et génèrent un réseau de franges dont le pas est ajustable. Un traceur traversant ce réseau émet une succession d'impulsions lumineuses, dont la fréquence, détectée par un dispositif photoélectrique ultrasensible, est proportionnelle à sa vitesse. Par extension, cette technique est le plus souvent dénommée vélocimétrie Doppler, le terme plus adapté étant celui de vélocimétrie à franges. Cette méthode est par nature locale et se prête très bien à l'analyse des fluctuations de vitesse en raison de la très grande rapidité des détecteurs et du traitement des signaux.

A titre de prospective, signalons un regain d'intérêt actuel pour la mesure directe du décalage Doppler point par point dans une image (vélocimétrie Doppler globale). Cette voie est prometteuse puisqu'elle associe le principe de l'imagerie (large champ d'observation) à la mesure locale des vitesses; elle sort toutefois du cadre strict de cet exposé, étant encore réservée à quelques laboratoires de pointe en raison de sa complexité.

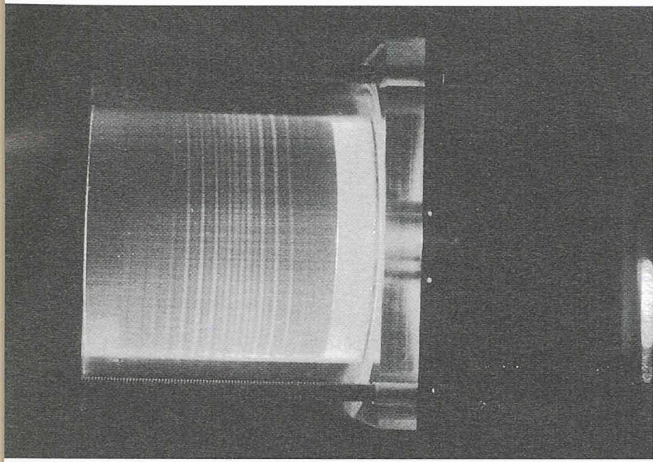


Fig. 3 : Visualisation par nappe oscillante, avec ensemencement en ligne, d'un écoulement en soufflerie sur une aile delta

Fig. 4 : Visualisation d'un écoulement dans une admission de moteur à essence. Le balayage tridimensionnel est automatisé

Fig. 5 : Écoulement de type Couette-Taylor dans un gaz (Visualisation tridimensionnelle à géométrie cylindrique)

(Photos: IGE, Belfort)

### Une question essentielle: les traceurs suivent-ils les écoulements ?

Excepté les méthodes exploitant les variations d'indice, les techniques décrites précédemment exigent toutes l'introduction de traceurs étrangers à l'écoulement. Visualisations et mesures portent en fait sur l'analyse des mouvements de ces traceurs, sensés reproduire fidèlement les mouvements du fluide. L'inertie des traceurs doit donc être minimisée, ce qui implique le plus souvent une réduction de leurs dimensions, une opération qui va dans le même sens que la garantie de leur caractère non intrusif, mais s'oppose à leur bonne « visibilité ». Leur masse volumique doit également être proche de celle du fluide afin d'éviter les phénomènes de sédimentation ou de flottaison. Le choix du bon traceur est donc affaire de compromis entre son comportement mécanique et son comportement optique.

Au cours des deux dernières décennies, d'innombrables solutions ont été testées:

- traceurs solides: billes de plastique (rilsan, polystyrène) ou de verre, paillettes métalliques, etc.,
- traceurs liquides: gouttelettes d'eau ou d'huiles variées,
- bulles de savon,
- fumées de combustion.

Notons que le savoir-faire correspondant, même s'il peut paraître peu noble sur le plan scientifique, est souvent à l'origine de l'échec ou de la réussite des expérimentations. Les précautions d'usage étant prises, différentes situations peuvent se présenter à l'expérimentateur.

- Les traceurs doivent être individualisés lors de la prise de vue (trajectographie ou vélocimétrie par imagerie): les dimensions submicroniques sont alors exclues et il convient d'augmenter la taille des particules (diamètre 10 - 50  $\mu\text{m}$ ) dans une mesure compatible avec le type d'écoulement étudié (vitesse, turbulence). Des bases de données expérimentales ainsi que des modèles théoriques de comportement sont disponibles aujourd'hui pour de larges domaines d'application, en hydro comme en aérodynamique.
- Les traceurs sont observés globalement: il devient alors possible de réduire leur taille, en se rapprochant de la valeur de la longueur d'onde d'éclairage (diamètre 0,5 - 5

$\mu\text{m}$ ). L'aspect trajectographie est alors perdu, mais la très faible inertie des traceurs permet d'admettre, dans la grande majorité des cas, qu'ils suivent fidèlement l'écoulement; on peut alors avoir accès à la vitesse de déplacement d'une population de traceurs (« nuages »), représentative par exemple, d'une structure de type tourbillonnaire ou d'un fort gradient de pression.

- Enfin, si les traceurs sont destinés à une mesure de vitesse dans un vélocimètre à franges, leur « visibilité » au sens de l'imagerie n'a aucune importance, mais une taille minimale est tout de même imposée par le seuil de détection des impulsions de lumière émises lors de la traversée des franges. Cette taille minimale est alors fortement dépendante de la puissance laser disponible, de la vitesse des particules et de la sensibilité du détecteur photoélectrique; les valeurs usuelles sont actuellement bien définies et souvent présentes dans les documents des constructeurs de matériel.

### Les contraintes spécifiques aux activités industrielles

*Expérimentation sur maquette ou in situ ?*

Dans le domaine de l'analyse optique des écoulements, le physicien travaillant dans son laboratoire dispose souvent d'une certaine liberté pour concevoir une expérience bien adaptée à la procédure d'investigation, en tenant compte de deux éléments déterminants:

- un accès aisé, à la fois pour l'éclairage et l'observation, constitue une première contrainte incontournable et implique, dans le cas où l'écoulement est confiné, la présence de parois transparentes ou l'installation de fenêtres lors de la conception de l'expérience;
- un accès non perturbant permettant de réaliser l'ensemencement du fluide représente un second critère inéluctable de mise en œuvre de l'expérimentation.

Un problème industriel appelle généralement une démarche inverse afin d'adapter la procédure d'investigation à une installation existante. La première étape du cahier des charges consiste donc à choisir entre la modification de l'installation existante et la construction (si toutefois celle-ci s'avère possible !) d'une maquette représentative.

#### L'INSTITUT DE GÉNIE ÉNERGÉTIQUE DE BELFORT

Rattaché à l'Université de Franche-Comté, cet institut est implanté dans le parc technologique de Belfort. Un des volets de recherche, sous la responsabilité du Professeur Jean-Pierre Prenel, regroupe les aspects « métrologie et microtechniques appliquées aux fluides et aux transferts ». Il occupe, depuis 1994, une douzaine de personnes. Opticiens, thermiciens, mécaniciens spécialistes dans l'étude des fluides pratiquent une pluridisciplinarité originale. L'activité métrologique se divise elle-même en deux sous-thèmes : métrologie optique pour la caractérisation des écoulements et métrologie thermique avec les microtechniques qui lui sont associées.

Ces dernières années, une plus grande attention a été portée à l'accroissement de la mesure quantitative, à l'investigation tridimensionnelle et à l'extension des méthodes au domaine acoustique. Certains travaux s'effectuent en collaboration avec l'industrie : étude en soufflerie industrielle d'une maquette du TGV à 1/10, caractérisation des écoulements dans une serre, étude de champs acoustiques pour les échappements de voiture, visualisation d'écoulements supersoniques pour améliorer le rendement de machines, compréhension et modélisation du comportement d'écoulements complexes lors du transport de fluides à grande distance (coudes, vannes).

Le professeur Prenel édite également la Revue Internationale *Journal of Flow Visualization and Image Processing*.

#### *Expérimentation à échelle réduite ou réelle ?*

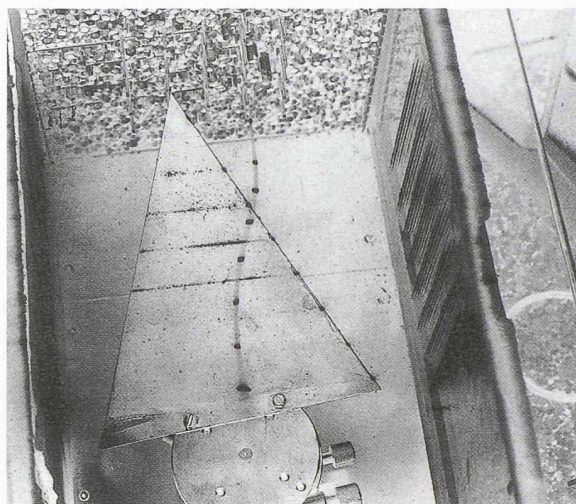
Ce problème, rencontré dans la plupart des démarches expérimentales en mécanique des fluides, reste bien sûr d'actualité dans le cas d'une analyse optique: les habituelles lois de similitude peuvent s'appliquer lorsque l'échelle unitaire est exclue ou trop onéreuse (aérodynamique des véhicules ferroviaires ou de gros aéronefs). Notons une règle universelle à ne pas négliger lorsque l'objet étudié demeure de grande dimension: l'observation d'un large champ exige toujours une forte puissance de la source laser, d'où un coût plus élevé.

#### *Les problèmes de sécurité*

Les règles de la sécurité laser sont aujourd'hui bien codifiées; elles concernent naturellement la protection des personnes (peau, yeux) mais aussi celle des matériels (risques d'inflammation dus aux fortes densités de puissance). Relativement faciles à respecter dans des laboratoires très spécialisés en présence de personnel hautement qualifié, ces règles peuvent compliquer l'implantation d'un système de visualisation ou de vélocimétrie de forte puissance lumineuse en milieu industriel. La réponse à ce problème peut donc modifier le choix entre expérimentation *in situ* et laboratoire spécialisé.

#### *Le rapport qualité-prix*

Le spécialiste pointu se voit souvent reprocher le fait de ne pas prendre en compte l'aspect financier lorsqu'il « milite » pour promouvoir une méthode novatrice en laquelle il croit. Cette critique vise fréquemment les méthodes optiques impliquant une source laser, en raison du prix d'achat élevé de ces dernières et des composants optiques associés. Les



performances incontestables de ces méthodes sont donc parfois contrebalancées par cet aspect économique. En réalité, la situation est beaucoup plus nuancée, car les configurations techniques rencontrées sont extrêmement variables; les deux exemples réels suivants, très éloignés sur le plan des investissements, en témoignent.

- L'entreprise A, de taille importante, produit divers composants aérauliques pour l'automobile et constate un besoin important d'optimisation de leurs géométries et de leurs dimensions sur le plan aérodynamique. Une série de méthodes optiques de visualisation sont validées dans un laboratoire spécialisé, sur maquettes transparentes, pendant une période de plusieurs mois. L'entreprise s'équipe ensuite d'un système complet de visualisation tomographique à hauteur de 350 kF (laser argon continu: 250 kF, composants optiques: 50 kF, caméra et traitement d'images: 50 kF). L'installation devient un outil quasi-permanent d'amélioration des produits ou de mise au point rapide de nouveaux produits.
- L'entreprise B, de petite taille, produit un type de composant aéraulique, également pour l'industrie automobile. Sur la base d'une idée novatrice, elle souhaite réaliser un saut technologique. Le produit pressenti est testé et validé en quelques jours dans un laboratoire spécialisé grâce à une simple méthode de visualisation tomographique; coût de la prestation: 50 kF.

Ces deux exemples montrent que la réputation de méthode onéreuse attachée à l'optique n'est pas toujours justifiée. L'explication scientifique est simple: dans les deux cas, l'observation globale d'un champ aérodynamique grâce à l'imagerie a donné une information suffisamment complète sur les phénomènes en jeu, tout en remplaçant de longues et fastidieuses séries de mesures locales classiques, dont le caractère intrusif introduisait par ailleurs un doute sur la fiabilité des résultats.

Le domaine privilégié des méthodes optiques est resté longtemps celui des souffleries utilisées par les chercheurs ou les industriels de l'aéronautique, une situation qui a du reste largement contribué à asseoir leur réputation de méthodes sophistiquées et chères évoquée dans le paragraphe précédent. C'est l'expansion très rapide des techniques d'enregis-

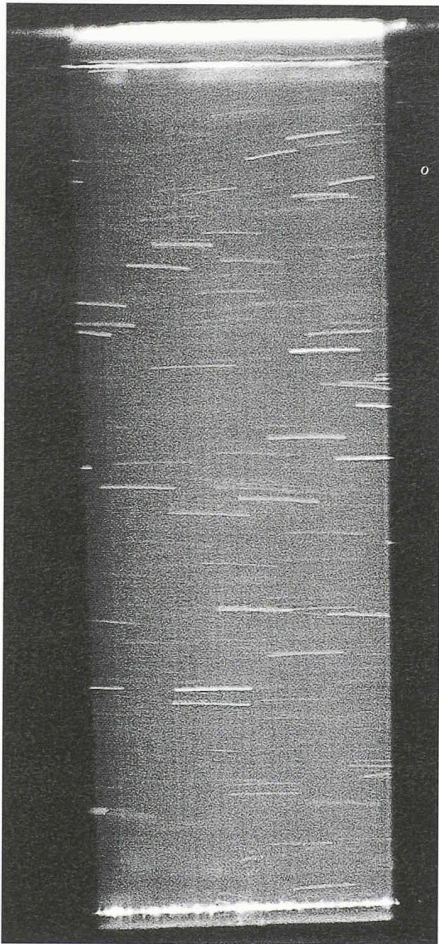


Fig. 6 : Nappe laser transversale, en déplacement séquentiel avec arrêts successifs (points noirs) et un seul point d'ensemencement

Fig. 7 : Visualisations polychromatiques dans un écoulement hydrodynamique, donnant un accès à une information tridimensionnelle (méthodes en développement)

(Photos: IGE, Belfort)

trement vidéo et de traitement informatique des images, allié à la démythification du laser, qui ont permis la « démocratisation » de ces techniques.

Aujourd'hui, toute activité industrielle faisant appel à des écoulements liquides ou gazeux suffisamment transparents, est susceptible de constituer un domaine d'application. Les exemples classiques, déjà traités depuis les années 80, abondent :

- systèmes de climatisation et de chauffage
- aérodynamique des véhicules terrestres et aériens
- refroidissement des systèmes thermiques et électriques
- écoulements atmosphériques en génie civil<sup>1</sup>.

En raison de leur très grande variété, ces applications se prêtent mal à un classement; toutefois, sur la base des critères habituels de la mécanique des fluides, retenons de manière synthétique :

- que les écoulements hydrodynamiques constituent un domaine d'investigation sans problèmes de principe majeurs: les faibles vitesses et les turbulences modérées facilitent le suivi des traceurs: de véritables trajectographies sont possibles, à condition toutefois que les écoulements soient bidimensionnels ou faiblement tridimensionnels;

- que les écoulements aérodynamiques (ou plus généralement gazeux) conduisent à un classement en trois groupes d'applications :

- 1) à basse vitesse, le fluide considéré comme incompressible permet une mise en œuvre aisée du suivi des traceurs: trajectographie en régime laminaire, cartographie des recirculations et accès fréquent au champ des vitesses;
- 2) à haute vitesse (régime supersonique essentiellement), la mise en évidence des trajectoires des traceurs devient difficile, voire impossible. En revanche, l'existence de gradients de masse volumique modifie la concentration des traceurs, ce qui ouvre la porte aux visualisations de phénomènes intenses comme les ondes de choc ou les sillages très turbulents;
- 3) à vitesse intermédiaire, et ceci dans une large gamme (10 m/s à 200 m/s), chaque configuration constitue un cas particulier et aucune règle universelle ne peut être solidement établie: l'organisation générale de l'écoulement, son caractère bi ou tridimensionnel, la présence d'obstacles, les possibilités d'ensemencement sont autant d'éléments à prendre en compte; une bonne connaissance des phénomènes les plus « probables » et donc une grande expérience, deviennent alors indispensables. Le recours à d'autres méthodes peut aussi devenir inéluctable, les opticiens n'étant malheureusement pas plus universels que les autres scientifiques.

### Perspectives

Le passage à une visualisation tridimensionnelle constitue le défi actuel des chercheurs. L'Institut de Génie Energétique de l'Université de Franche-Comté développe des méthodes prometteuses, appelées méthodes polychromatiques. Elles devraient, dans quelques mois, être accessibles au monde industriel.

### Pour en savoir plus

- W. MERZKIRCH: « Flow Visualization », Academic Press, 1987  
 K. C. CHENG: « History of Flow Visualization: Chronology - Journal of Flow Visualization and Image Processing », 4 - 1 (1997) pp. 9 - 27  
*Dans les techniques de l'ingénieur: Traité des Sciences Fondamentales*  
 J. P. PRENEL et P. SMIGIELSKI: « Mécanique des fluides: Visualisation », Documents AF 3.330 à 3.333  
*Actes des Colloques Nationaux*  
 « Visualisation et Traitement d'Images en Mécanique des fluides », FLUVISU 99, Edit. P. Hebrard Ensica, Toulouse  
 « Vélocimétrie Laser », 6ème Congrès francophone, Saint-Louis, 1998, ISL / AFVL

### Remerciements

La rédaction adresse de chaleureux remerciements au professeur Prenel qui nous a communiqué le texte de sa conférence présentée à la Société Française d'Optique, le 18 novembre 1999.

<sup>1</sup> Ce terme général recouvre des études en soufflerie de maquettes d'ouvrages afin de connaître leur comportement au vent, des études en soufflerie de la dispersion des fumées et polluants (cheminées) ou encore des études en soufflerie ou *in situ* de transport de la neige par le vent, de son accumulation en montagne (corniches), sur les routes (congères), etc.