

Approche documentaire

Relier la nature de l'écoulement à la valeur du nombre de Reynolds.

Considérons l'écoulement d'un fluide, de l'eau par exemple, dans un tuyau cylindrique. Comme l'a remarqué le physicien irlandais Osborne Reynolds (1842-1912) en 1883, l'écoulement peut présenter des caractéristiques variées. Une manière de visualiser ces différences de comportement est l'injection d'un mince filet de colorant au milieu de la conduite.

Dans un régime dit *laminaire*, correspondant aux faibles vitesses, le colorant reste localisé au centre de la conduite en suivant un filet rectiligne (Fig. 25). En revanche, en régime *turbulent*, le colorant acquiert aléatoirement des vitesses transverses notables, ce qui conduit à un mélange du colorant jusqu'aux zones proches des parois (Fig. 26). La turbulence est un phénomène aléatoire, très sensible aux conditions initiales. La turbulence fait apparaître la plupart du temps des tourbillons, dont les tailles peuvent s'étendre sur plusieurs ordres de grandeur. Vu sa complexité, la turbulence reste l'objet de nombreuses études actuelles, expérimentales et théoriques.

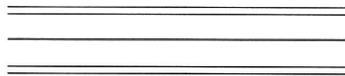


Figure 25

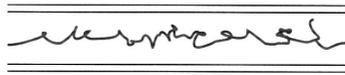


Figure 26

Reynolds, en effectuant de nombreuses expériences, a identifié les paramètres permettant de déterminer *a priori* si un écoulement est laminaire ou turbulent. Il est essentiel de comprendre quel critère gouverne l'apparition de ces phénomènes. Ainsi, en réalisant plusieurs expériences, on observe que si on double le diamètre du cylindre, il faut aussi des vitesses deux fois supérieures pour obtenir un écoulement aux caractéristiques similaires. Ce type de résultat laisse envisager qu'une loi d'échelle régit ce phénomène. Une analyse dimensionnelle est alors fort pertinente. L'objectif est d'obtenir un nombre sans dimension, permettant de caractériser l'écoulement. En effet, former un nombre sans dimension pour un phénomène physique donné permet de caractériser et de préciser la situation. Un tel nombre, alors forcément indépendant du système d'unités choisi, met en évidence des similarités entre des conditions expérimentales *a priori* différentes.

Il faut alors identifier les paramètres physiques d'intérêt dans cette situation. Indiscutablement, la viscosité η du fluide est essentielle. L'observation de turbulence requiert des vitesses bien plus élevées en utilisant un fluide plus visqueux que l'eau. Comme on l'a signalé ci-dessus, la vitesse caractéristique de l'écoulement, notée v , ainsi que le diamètre du cylindre, ou plus généralement la distance typique (transverse) L ,

caractérisent l'écoulement (pour un écoulement dans une conduite, L est ainsi égal au diamètre). Intéressons-nous aux dimensions de ces termes :

$$[\eta] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}, [v] = L \cdot T^{-1} \text{ et } [L] = L.$$

On constate que seul le premier terme contient une masse. Ce fait suggère qu'il manque un paramètre le contenant. Le choix le plus naturel est alors de prendre en compte la masse volumique μ du fluide. Un calcul sans difficulté montre que la quantité :

$$Re = \frac{vL\mu}{\eta}$$

est sans dimension. On la nomme *nombre de Reynolds*,

Pour l'écoulement dans une conduite cylindrique, on constate que la transition a lieu pour $Re \approx 2300$. Lorsque $Re \leq 2000$, l'écoulement est alors dominé par les phénomènes visqueux. Les écoulements « lents » font partie de cette classe : on peut citer l'écoulement d'un glacier, du miel s'écoulant d'un pot... Lorsque $Re \geq 3000$, l'écoulement est turbulent.

Il est aussi possible d'interpréter le nombre de Reynolds d'une manière un peu différente. On s'intéresse à la manière dont la quantité de mouvement est transférée d'un point à un autre d'un écoulement, séparés par une distance L . La première possibilité est la *convection* : en entraînant des particules, l'écoulement transporte aussi leur quantité de mouvement. Ainsi, pour un écoulement de vitesse typique v , le temps τ_{conv} nécessaire pour réaliser une convection sur une distance L est :

$$\tau_{conv} \approx \frac{L}{v}.$$

Une autre possibilité de transport de quantité de mouvement est liée à la viscosité : les couches rapides entraînent les couches lentes, ce qui constitue aussi un transfert de quantité de mouvement. On admet que ce phénomène est de nature diffusive (il obéit à des lois similaires à celles de la conduction thermique), de coefficient de diffusion $D = \frac{\eta}{\mu}$. Alors, le temps τ_{diff} nécessaire pour une diffusion sur une distance L est :

$$\tau_{diff} \approx \frac{L^2}{D} = \frac{\mu L^2}{\eta}.$$

Le nombre de Reynolds s'identifie alors au rapport :

$$Re = \frac{\tau_{diff}}{\tau_{conv}}$$

Si $Re \ll 1$, le transfert de quantité de mouvement par diffusion est bien plus rapide que par convection : les effets visqueux dominent et l'écoulement est laminaire. Dans le cas inverse $Re \gg 1$, la convection est bien plus efficace que la diffusion visqueuse, ce qui correspond à un écoulement turbulent. En d'autres termes, le nombre de Reynolds représente le quotient de l'importance de l'inertie par celle de la viscosité. L'inertie est alors comprise au sens du principe d'inertie, c'est-à-dire le fait qu'un corps soumis à aucune force a tendance à poursuivre son mouvement.

On a donc obtenu un critère simple, permettant de connaître *a priori* la nature des écoulements. Néanmoins, les valeurs précises des nombres de Reynolds critiques séparant un régime d'un autre restent dépendantes de la géométrie précise du système. On peut retenir plus généralement : si $Re \leq 1$, l'écoulement est laminaire et turbulent pour $Re \geq 3000$.

L'étude du sillage derrière un cylindre permet d'appréhender avec un objet de géométrie simple les caractéristiques principales des sillages complexes des objets réels en mettant en évidence des phénomènes tels que le décollement de couche limite, la transition laminaire-turbulente de la couche limite...

Considérons un écoulement autour d'un cylindre fixe et voyons comment il évolue en fonction du nombre de Reynolds.

Pour des valeurs du Reynolds inférieures à dix environ, les lignes de courant sont stationnaires et l'écoulement est partout laminaire, couche limite comprise (figure 1), qui reste partout au contact de la surface du cylindre. On dit que l'écoulement est rampant. La dissipation visqueuse est essentiellement localisée dans la couche limite (le reste de l'écoulement étant proche de celui d'un fluide parfait) et reste donc limitée.

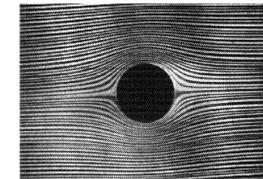


Figure 1

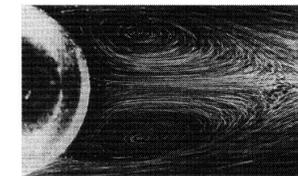
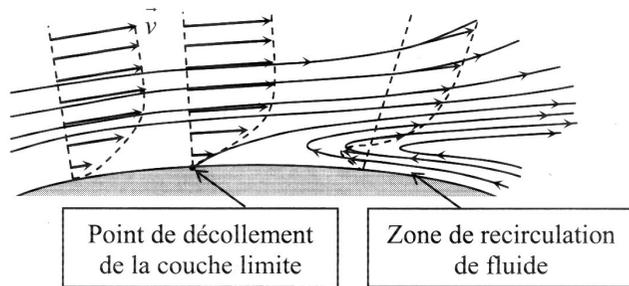


Figure 2

Pour des valeurs de Re de l'ordre de quelques dizaines, il apparaît derrière le cylindre un sillage formé d'une paire de tourbillons symétriques stationnaires. Ces tourbillons sont générés dans la couche limite, où la vitesse peut subir de très fortes perturbations jusqu'à présenter une inversion locale de sens : la couche limite se décolle de la surface, créant des tourbillons. Le point de décollement se déplace vers l'amont du cylindre lorsque le Re augmente.



Lorsque Re augmente encore (de quelques dizaines à quelque centaines suivant les cas) des tourbillons se détachent périodiquement du cylindre, alors que d'autres les remplacent. Les lignes de courant sont encore identifiables : on obtient alors une allée de tourbillons de sens de rotation alternés dite « allée de Von-Karman ». Ces écoulements s'observe aussi bien en laboratoire (figure 4 : visualisation d'une allée de Von-Karman par tomographie laser) qu'en aval d'une pile de pont ou à l'échelle d'écoulements atmosphériques (figure 3 : allées de Von-Karman sous le vent des îles du Cap Vert).

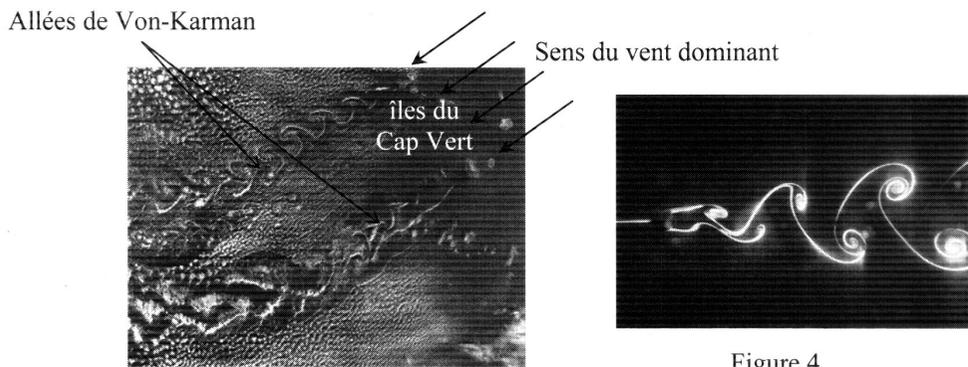


Figure 3

Figure 4

À partir d'une valeur critique de Re (comprise suivant les cas entre quelques centaines et $2 \cdot 10^5$), l'écoulement en aval du cylindre devient turbulent et forme un sillage dans lequel le champ de vitesse est chaotique (fortes variations spatio-temporelles aléatoires), les lignes de courant ne sont plus identifiables (figure 5). La couche limite est encore laminaire. La dissipation visqueuse est à présent principalement localisée dans le sillage turbulent et augmente d'autant plus que le sillage est important, d'où l'importance en aérodynamisme de réduire le sillage, ce qui se fait classiquement en profilant l'obstacle (bord d'attaque et de fuite d'une aile ou forme fuselée des voitures de course). En dehors du sillage, l'écoulement reste laminaire.

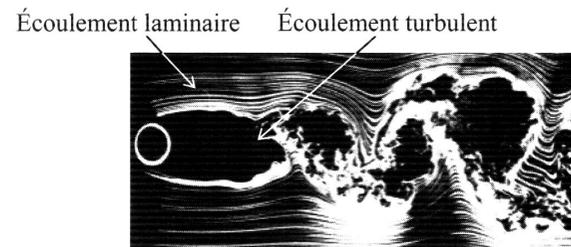


Figure 5

Au-delà de $2 \cdot 10^5$, la couche limite devient turbulente, ce qui se traduit par une forte diminution de C_x dans cette gamme de Re (figure 6).

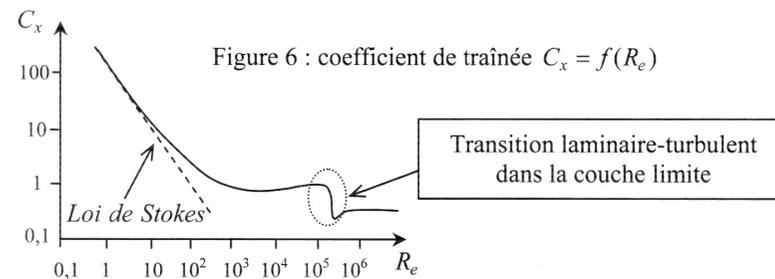


Figure 6 : coefficient de traînée $C_x = f(Re)$

Le point de décollement se déplace vers l'aval quand le nombre de Reynolds augmente, ce qui traduit le fait que la couche limite turbulente a tendance à « recoller » à la surface. On retiendra schématiquement qu'une couche limite turbulente décolle moins facilement qu'une couche limite laminaire, du fait du fort brassage d'énergie à l'échelle macroscopique entre les couches inférieures d'une couche limite turbulente. Ainsi, une aspérité de dimension correctement choisie et placée sur la surface d'un obstacle lisse, en rendant la couche limite turbulente, provoque son recollement et par suite une forte réduction du sillage turbulent et donc de la traînée (figures 7 et 8). C'est le principe des balles de golf rugueuses.

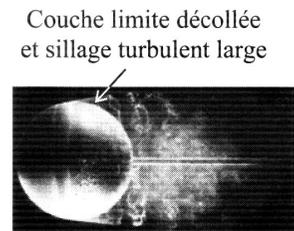


Figure 7 : balle lisse

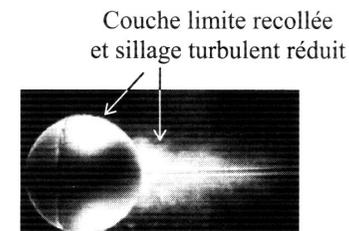


Figure 8 : balle présentant une aspérité

Au-delà de cette transition la couche limite reste turbulente et on observe que C_x reste quasi constant (voir figure 6).

Approche documentaire

Analyser des méthodes et des dispositifs de mesure des grandeurs caractéristiques d'un écoulement.

Le domaine de la caractérisation des écoulements est extrêmement vaste et les méthodes varient énormément, que l'on s'intéresse à des applications :

- industrielles ou domestiques, d'étude de la circulation ou de mesure de la consommation de liquide ;
- géologiques, d'étude des cours d'eau ou de la circulation souterraine (hydrogéologie) ;
- médicales, pour la circulation sanguine par exemple...

Il n'est donc pas question de prétendre ici à une quelconque exhaustivité, on se contente d'évoquer quelques dispositifs de *mesures de débits* de fluides incompressibles.

Le fil conducteur retenu est basé sur l'examen du compromis entre :

- la précision de la mesure, qui peut être impérative lorsqu'on désire facturer une consommation d'eau ou un achat de carburant ;
- l'existence d'une perturbation apportée à l'écoulement par le dispositif de mesure, décrite à travers la notion de perte de charge singulière dans le cours.

Quelques solutions sont ainsi présentées, dont on cherche à définir en quoi elles privilégient la précision de la mesure, au prix d'une perturbation sensible de l'écoulement ou l'inverse.

a) Compteur volumétrique

L'organe qui est familier dans la vie courante est le compteur de mesure du volume d'eau domestique consommée (Fig. 12). Notons qu'il est également présent dans les pompes à essence, dont les normes fixent avec rigueur la précision exigée et, plus généralement, dans de multiples applications industrielles où la détermination d'un volume de liquide écoulé est requise.

Pour atteindre une précision importante, le dispositif met par exemple en œuvre une solution mécanique, dont le principe est de faire passer le liquide à travers un organe de volume connu, qui se remplit et se vide au fil de la distribution.

Pour la continuité du débit, un solide contenant plusieurs de ces cavités est en rotation : lorsqu'une des chambres se remplit, une autre se vide. Le débit est donc directement proportionnel à la vitesse de rotation du compteur et on détermine le volume total débité, en une durée donnée, *via* le nombre de tours effectués. Ce procédé est élémentaire, très fiable et facilement opposable en cas de contestation, mais son incidence sur l'écoulement est très importante.

Typiquement, une perte de charge de l'ordre de $\Delta P_C = 0,5 \text{ bar}$ ($5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$) est induite par le capteur, pour un débit de $4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (environ $10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en unités internationales).

L'ordre de grandeur de la précision d'un compteur donné dépend de sa classe de fonctionnement, mais également du débit (dérive aux très faibles ou aux très forts débits), elle est de quelques % en général (2 % typiquement).

b) Capteur dit « à mesure de pression dynamique »

La présence, dans la loi de Bernoulli, de termes en $\frac{1}{2} \rho v^2$

ajoutés à la pression, conduit certains auteurs à donner le nom de pression dynamique à la quantité $P + \frac{1}{2} \rho v^2$, par opposition à pression statique P .

Dans l'hypothèse d'une homogénéité des vitesses sur une section de conduite, il suffit de mesurer la vitesse en un point pour connaître le débit volumique (on multiplie par l'aire de la section).

Un procédé très répandu exploite ces propriétés : le tube de Pitot (Fig. 13).

Schématiquement, le point B est un point d'arrêt (point de vitesse nulle), tandis qu'au point A, le fluide s'écoule avec la vitesse v .

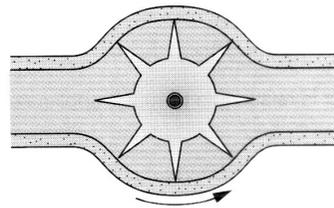


Figure 12

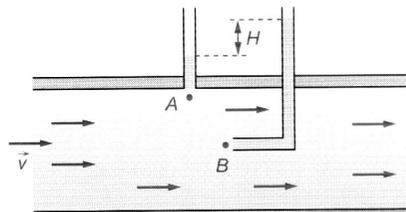


Figure 13

La relation de Bernoulli, combinée à la loi de l'hydrostatique dans les portions verticales, aboutit à $D_v = S \sqrt{2gH}$ où H est la différence de hauteur dans les deux tubes.

Toutefois, l'homogénéité de la vitesse sur une section est supposée mais pas toujours avérée. Dans le cas où la vitesse est très inégalement répartie, on peut multiplier les tubes de Pitot sur la section, ceci accroît la précision mais également la perturbation induite dans l'écoulement.

Ce dispositif est néanmoins d'une très grande simplicité, il est très couramment utilisé, par exemple dans le domaine aérospatial.

c) Dispositif à dépression

De nombreux systèmes existent, qui utilisent une conséquence de la loi de Bernoulli : l'apparition d'une dépression dans un étranglement.

Qualitativement en effet, lorsqu'une conduite parcourue en régime stationnaire par un fluide incompressible présente un rétrécissement (Fig. 14), la conservation du débit impose l'augmentation de la vitesse dans l'étranglement :

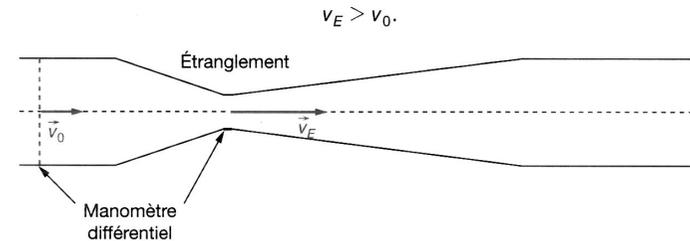


Figure 14

Or la relation de Bernoulli appliquée dans ces conditions à un fluide parfait stipule :

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{1}{2} v_0^2 = \frac{P_E}{\rho} + \frac{1}{2} v_E^2.$$

Les termes de pesanteur n'ont pas été repris car l'écart $z_0 - z_E$ est nul ou sinon négligeable.

Finalement, $v_E > v_0$ a pour conséquence $P_E < P_0$, on parle d'*effet Venturi* (du nom du physicien italien Giovanni Battista Venturi qui l'a décrit à la fin du XIX^e siècle).

De nombreux dispositifs sont alors basés sur la mesure de débit liée à cette différence de pression (un exercice en fin de chapitre détaille l'étude de principe).

La mesure de la différence de pression peut être effectuée par un dispositif électronique, appelé manomètre différentiel, ce qui permet de disposer d'une grandeur électronique à traiter ensuite.

Le dispositif à mesure de dépression, plus couramment appelé dispositif Venturi, constitue un excellent compromis entre précision et faible perte de charge : on atteint couramment 2 % de précision pour une perturbation induite sur l'écoulement bien moindre que le dispositif volumétrique.

d) Méthodes alternatives

Sans plus recourir à la loi de Bernoulli, on cite pour terminer un procédé sophistiqué, utilisé couramment dans le domaine médical où l'interruption de la circulation sanguine est impossible.

Une onde ultrasonore est envoyée sur l'artère dans laquelle circule le sang (Fig. 15). L'effet Doppler évoqué dans le cours sur les ondes a pour conséquence un changement de fréquence de l'onde écho (le procédé est identique à celui des radars routiers de mesure de la vitesse des véhicules). On déduit alors la vitesse d'écoulement et par suite le débit (l'échographie permet une mesure précise du diamètre de l'artère).

Sans induire de perte de charge (la quantité de mouvement mise en jeu par l'onde est infime), on mesure avec une grande précision les caractéristiques de l'écoulement.

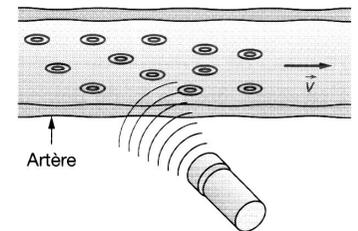


Figure 15

Méthodes peu intrusives

→ Une méthode pour imager les lignes de courant consiste à injecter des filets de colorant dans l'écoulement. Lorsque le fluide est par exemple de l'eau, il s'agit d'injecter de l'eau colorée (assez faiblement pour ne pas affecter notablement la densité du jet), s'il s'agit d'écoulement d'air (comme en soufflerie), on injecte alors des filets de fumée. On peut aussiensemencer le fluide à l'aide de fines particules que l'on suivra dans l'écoulement par imagerie.

→ L'utilisation de colorant fluorescent mis en évidence dans une nappe laser conduit à une image en coupe du champ des vitesses de l'écoulement : c'est la méthode de tomographie laser. Là encore, il est possible d'ensemencer le fluide avec des particules qui diffusent la lumière dans la section de la nappe laser. L'image des particules ainsi éclairées est alors enregistrée à l'aide d'une caméra.

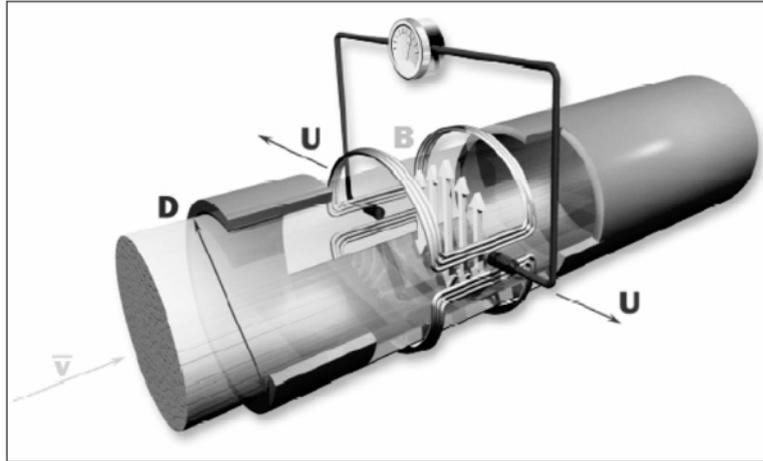
→ La PIV (vélocimétrie par intercorrélation d'images de particules) est basée sur un traitement des images tomographiques pour quantifier les vitesses du fluide contenu dans les plans de coupe laser. On mesure pour cela le déplacement des particules entre deux images successives grâce à des algorithmes d'intercorrélation d'images. L'éclairage du plan de mesures est assuré par un laser pulsé pour obtenir des images successives, séparées par un intervalle de temps très court (quelques microsecondes).

→ La vitesse locale de l'écoulement peut être mesurée par anémométrie Doppler Laser (ADL). On exploite ici l'effet Doppler : la fréquence des ondes lumineuses diffusées par des particules en mouvement est décalée par rapport à celle de la source Laser qui les éclaire d'une valeur qui est proportionnelle à la composante de la vitesse de la particule qui se trouve dans le plan des deux faisceaux laser. En faisant interférer deux faisceaux laser au point de l'écoulement où l'on veut faire la mesure, on récupère l'onde diffusée dont l'intensité renseigne sur la vitesse.

→ L'ombroscopie consiste à exploiter la variation d'indice d'un milieu transparent avec sa densité (et donc avec sa pression et sa température). Un montage d'optique adapté permet de visualiser l'ombre portée dont le profil d'intensité est relié au gradient d'indice.

DEBITMETRE ELECTROMAGNETIQUE

Le débitmètre électromagnétique fonctionne suivant le principe de Faraday. Quand un liquide conducteur s'écoule perpendiculairement à travers un champ magnétique, une différence de potentiel électrique est créée au sein du liquide. Cette différence de potentiel, captée à l'aide de deux électrodes permet, par le calcul, d'en déduire la vitesse puis le débit du fluide.



Documentation Krohne

Cette création de tension électrique s'explique simplement si on observe les forces qui s'exercent sur les anions et cations présents au sein du liquide.

Une charge électrique (électron, anion, cation) qui se déplace dans un champ magnétique subit une force (force de Laplace) qui tend à faire dévier cette charge de sa trajectoire initiale.

Selon que cette charge est positive ou négative elle sera déviée dans un sens ou dans le sens opposé. Cette force s'exprime de la façon suivante : $F=qv \wedge B$ où q est la charge de la particule, v est le vecteur vitesse et B le vecteur champ magnétique.

Il en résulte une zone plutôt positive et une zone plutôt négative au sein du liquide qui passe dans le champ magnétique. On peut mesurer alors entre ces deux zones une différence de potentiel électrique à l'aide d'un voltmètre. Cette différence de potentiel ou tension, mesurée, sera directement proportionnelle à la vitesse des charges, donc à la vitesse du liquide et à son débit. Le liquide passant dans le champs magnétique, les charges subissent la force de Laplace et leurs trajectoires sont modifiées différemment selon leurs signes.

Un débitmètre électromagnétique industriel est constitué par un tube en matériau non magnétique, revêtu intérieurement d'un revêtement isolant. Deux bobines d'induction sont disposées de part et d'autre de la conduite. Elles créent un champ magnétique alternatif pour éviter une polarisation des électrodes, et un champ magnétique basse fréquence pour éviter les parasites.

Limites de température : - 25°C à + 180 °C

Pression : jusqu'à 40 bar

Vitesse du fluide : 0,2 à 10 m/s

Diamètre de raccordement : 2mm à 2m

Erreur de justesse : 0,2 % à 3 % de la valeur mesurée

Perte de charge : nulle

Temps de réponse : à partir de 0,1 s

Conductivité nécessaire du fluide : à partir de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$

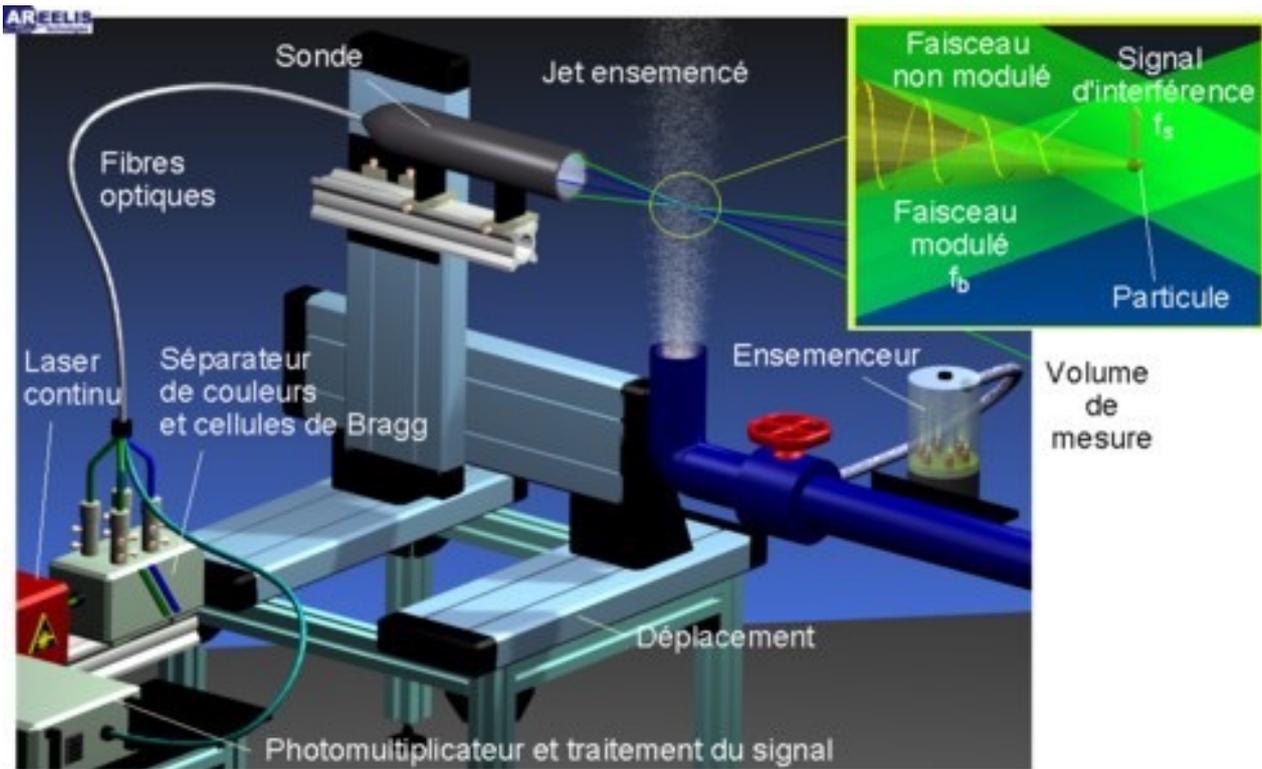
Avantages :

- aucune perte de charge
- la grandeur mesurée est directement proportionnel au débit (réponse linéaire)
- large gamme de diamètres de conduite possible (de quelques mm à 2 m)
- peut mesurer un écoulement bidirectionnel
- utilisable avec des liquides agressifs et corrosifs, avec des boues - relativement insensible à la densité, viscosité et profil d'écoulement du fluide
- le facteur d'étalonnage ne varie pas au cours du temps
- peut être précédé d'une longueur droite courte (inférieure à 20 fois le diamètre)

Inconvénients :

- son prix
- ne peut être utilisé que pour des liquides conducteurs du courant électrique (ce qui exclu les hydrocarbures et solvants organiques)

Anémométrie Doppler Laser



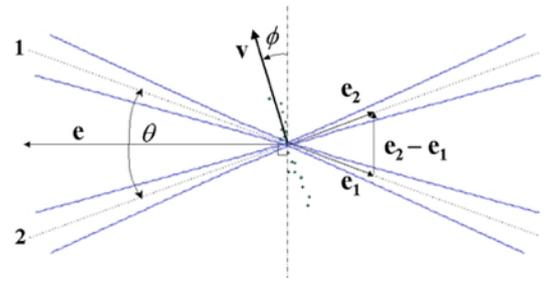
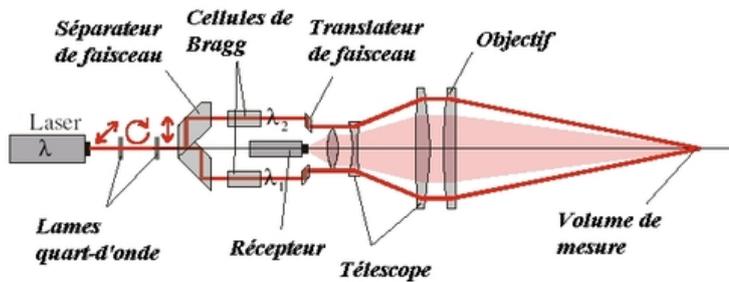
L'Anémométrie Doppler Laser (ADL) est une méthode optique permettant de mesurer localement la vitesse de l'écoulement avec un taux d'échantillonnage temporel élevé. Son principe consiste à faire interférer deux faisceaux laser à l'endroit de l'écoulement où l'on désire faire la mesure. Lorsque les particules ensemençées dans l'écoulement traversent le volume de mesure formé par les faisceaux, celles-ci diffusent un signal lumineux, modulé par l'interférence, que l'on collecte à l'aide d'un photomultiplicateur. La fréquence du signal f_s est directement proportionnelle à la vitesse U de la particule.

$$U = \frac{\lambda f_s}{2 \sin(\theta/2)}$$

Avec λ la longueur d'onde du laser et θ l'angle entre les deux faisceaux. La direction du vecteur vitesse correspond à celle du plan contenant les deux faisceaux. Le sens est déterminé en décalant la fréquence d'un des faisceaux incidents à l'aide d'une cellule de Bragg contrôlable. Tenant compte de cette fréquence de décalage, f_b , l'expression de la vitesse devient :

$$U = \frac{\lambda(f_s - f_b)}{2 \sin(\theta/2)}$$

Généralement, les dispositifs ADL utilisent 2 (ou 3) paires de faisceaux laser de couleurs différentes, qui en se croisant perpendiculairement au point de mesure donne accès simultanément à 2 (ou 3) composantes de vitesses.



Les particules qui traversent le volume de mesure diffusent la lumière dans toutes les directions avec une intensité non uniforme. La lumière est observée dans la direction du vecteur unitaire \mathbf{e} . Avant diffusion les faisceaux ont respectivement les fréquences $\nu_1 = \nu_0 + \nu_{\delta 1}$ et $\nu_2 = \nu_0 + \nu_{\delta 2}$, où $\nu_{\delta 1}$ et $\nu_{\delta 2}$ sont les fréquences de Bragg et ν_0 est la fréquence du laser.

Le faisceau diffusé 1 ayant subi le décalage Doppler $\delta \nu_{D1}$ a une fréquence $\nu_1 = \nu_0 + \nu_{\delta 1} + \delta \nu_{D1}$; il interfère avec le faisceau diffusé 2 qui a subi un décalage Doppler $\delta \nu_{D2}$ de fréquence $\nu_2 = \nu_0 + \nu_{\delta 2} + \delta \nu_{D2}$.

Le signal d'interférence a une fréquence instantanée égale à la différence des deux fréquences :

$$\nu_1 - \nu_2 = (\nu_{\delta 1} - \nu_{\delta 2}) + (\delta \nu_{D1} - \delta \nu_{D2})$$

Les décalages Doppler sur les faisceaux 1 et 2 sont respectivement :

$$\delta \nu_{D1} = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{e}_1) / \lambda \quad \text{et} \quad \delta \nu_{D2} = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{e}_2) / \lambda$$

, où \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 sont les vecteurs unitaires des deux faisceaux incidents sur le volume de mesure.

La différence des deux décalages Doppler est $\delta \nu_D = \delta \nu_{D1} - \delta \nu_{D2} = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_1) / \lambda$.

Le signal d'interférence est un signal modulé en fréquence : $f_I = \nu_{\delta} + \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_1) / \lambda$ avec une fréquence porteuse $\nu_{\delta} = \nu_{\delta 1} - \nu_{\delta 2}$. La démodulation du signal permet d'accéder au terme $\delta \nu_D = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_1) / \lambda$ qui dépend de l'angle ϕ entre la vitesse et le vecteur $\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_1$ et de l'angle θ entre les directions des deux vecteurs unitaires \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 .

D'après la figure on a :

$$\delta \nu_D = 2v \cdot \cos(\phi) \sin(\theta/2) / \lambda$$

Intérêt :

- *Suivi temporel. La qualité de celui-ci dépend cependant de l'échantillonnage lié à la fois du nombre de particule passant dans le volume de mesure et de la qualité du signal reçu. Dans de bonnes conditions de mesure, il est possible d'atteindre des fréquences de 20 000 Hz.*
- *Possibilité d'avoir aisément deux composantes (et parfois trois) du vecteur vitesse.*
- *Les sondes ADL actuelles intègrent dans un même élément, à la fois l'émission laser et la réception du signal (la lumière est transportée par fibres optiques).*
- *Grâce à un traitement du signal performant à base de différents filtres, la qualité de l'ensemencement est moins critique. Il est donc possible d'utiliser comme traceur, des particules déjà présentes dans le système (poussières, fibres...)*

Cette technique est donc adaptée aux mesures sur sites industriels où les accès optiques sont restreints, l'écoulement est complexe et tridimensionnel.

Limites :

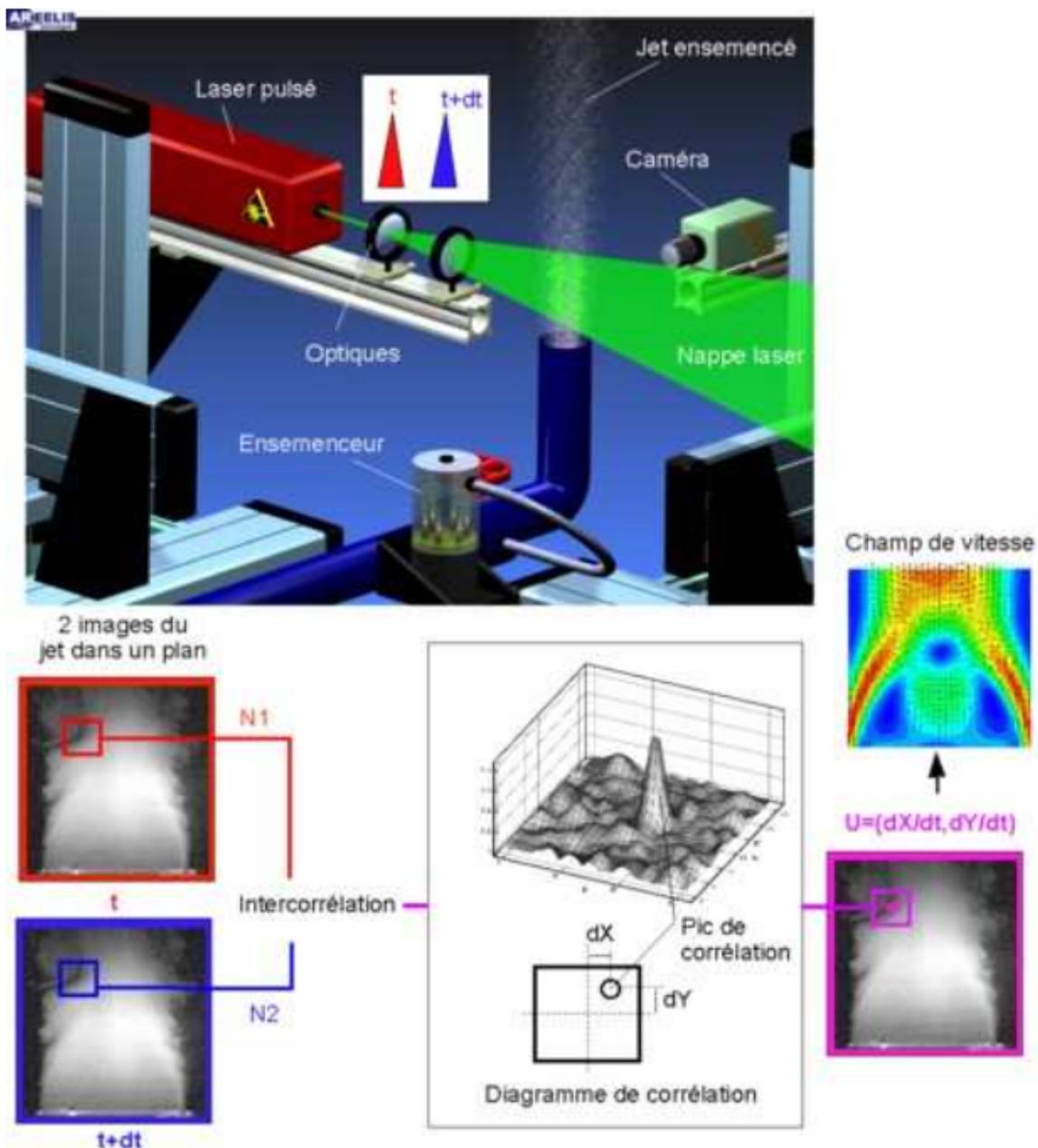
- *Mesure locale. En déplaçant le volume de mesure, il est possible de décrire la structure globale de l'écoulement mais les résultats obtenus ne fournissent qu'un champ de vitesses moyennes.*
- *Encombrement du dispositif de mesure : même si la sonde en elle-même a une taille réduite, les lasers argon utilisés actuellement sont encore encombrant et nécessitent une alimentation triphasée et un refroidissement à eau.*

Vélocimétrie par Intercorrélation d'Images de Particules

La PIV reprend le principe de la tomographie laser où l'écoulement fluide est visualisé par coupes. Pour cela, on éclaire, avec une nappe laser, une tranche de cet écoulement, préalablement ensemencé avec des particules. Les particules contenues dans cette fine section diffusent la lumière du laser selon un mécanisme obéissant aux lois de Lorenz-Mie. L'image des particules ainsi éclairées est alors enregistrée à l'aide d'une caméra.

Ces images tomographiques peuvent être employées pour quantifier les vitesses du jet contenues dans les plans de coupe laser. Ces vitesses sont obtenues en mesurant le déplacement des particules entre deux images successives. Depuis le milieu des années 80, grâce aux progrès technologiques sur les lasers, les caméras et les moyens de calculs, les méthodes de vélocimétrie utilisant des images de particules ont connu de nombreuses évolutions. Aujourd'hui, la technique la plus utilisée et la plus précise consiste à calculer le déplacement grâce à des algorithmes d'intercorrélation d'images.

Le dispositif destiné aux mesures de PIV conserve les éléments de base propres aux études par tomographie laser, c'est-à-dire, une nappe laser et une caméra CCD positionnée perpendiculairement à la nappe. Ici, l'éclairage du plan de mesures est assuré par un laser pulsé pour obtenir des images successives, séparées par un intervalle de temps très réduit (quelques microsecondes) et garantir ainsi le caractère instantané de la mesure.

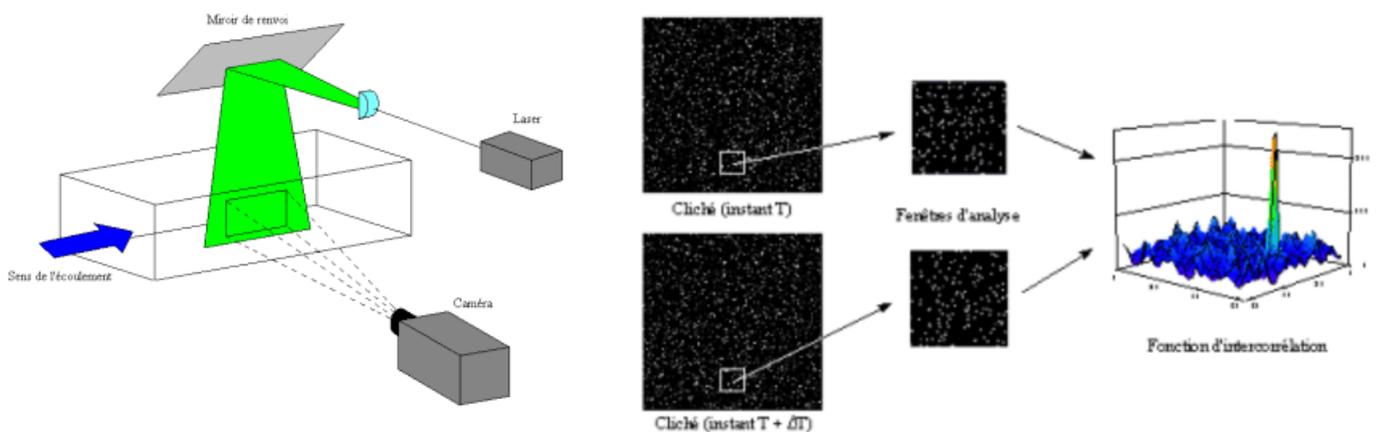


Les vitesses de l'écoulement sont obtenues ici à l'aide d'un algorithme d'intercorrélation d'images. Sur chacune des deux images, l'une à l'instant t et l'autre à l'instant $t+dt$, on définit au même endroit une fenêtre dans laquelle va s'effectuer le calcul. La corrélation est effectuée à partir de l'intensité, N des pixels de ces deux fenêtres en utilisant par exemple l'expression d'intercorrélation directe :

$$\mathcal{R}_{N_1, N_2}(x, y) = \frac{\sum_i \sum_j N_1(i, j) N_2(i + x, j + y)}{\sum_i \sum_j N_1(i, j) \sum_i \sum_j N_2(i, j)}$$

Pour réduire les temps de calcul, il est plus courant d'utiliser les propriétés de l'espace de Fourier grâce à des algorithmes de transformées de Fourier rapides (ou FFT).

Le résultat de l'intercorrélation se traduit graphiquement par la présence d'un pic.



Le déplacement moyen des particules dans la maille est égal à la distance entre le pic et l'origine au centre du diagramme d'intercorrélation. La vitesse s'obtient alors en divisant cette distance par dt . Ce type de traitement, répété sur l'ensemble de l'image, permet de reconstruire le champ de vitesse dans le plan de mesure. Malgré tout, l'intercorrélation peut conduire à la présence de quelques vecteurs aberrants qu'il est nécessaire d'ôter pour l'exploitation des résultats par différentes méthodes de post-traitement.

Ces mesures permettent d'obtenir deux des composantes d'un champ de vitesse. Une méthode (la stéréoPIV) utilisant simultanément deux caméras est cependant possible pour évaluer la troisième composante.

Intérêt :

- Mesure d'un champ instantané sur un plan. Visualisation des structures tourbillonnaires.
- Dispositif de mesure généralement peu encombrant et mobile.
- Forte résolution spatiale

Limites :

- Ensemencement correct indispensable.
- L'écoulement doit avoir des directions essentiellement dans le plan de mesure.
- Deux accès optiques perpendiculaires sont nécessaires.
- Etude 3D et résolue en temps encore difficile à mettre en oeuvre avec cette technique.

