

Les capteurs de vitesse

SUITE DU N° 1837

L'application des lois de la mécanique classique peut être d'un grand secours dans certains cas particuliers de capture de vitesse. C'est notamment le cas pour la vitesse angulaire ou encore la vitesse linéaire d'un fluide. Un simple coefficient de proportionnalité permet alors de passer de la grandeur captée à la vitesse recherchée, ou un comptage d'impulsions.

Pour une rotation très lente

La dynamo tachymétrique, comme les autres capteurs de vitesse classiques, ne fonctionne plus quand la vitesse de rotation est très faible. On fait alors appel à un système mécanique ingénieux, utilisant une force particulière due à l'« accélération de Coriolis ». Nous n'en donnerons pas une étude poussée, il y aurait de quoi horripiler les lecteurs. Mais nous nous bornerons à indiquer un cas où cette force peut être mise en évidence très simplement.

La figure 7 représente, vu de dessus, une sorte de manège forain, tournant autour d'un axe vertical O. Un homme H, debout sur le bord du plateau tournant, regardant dans le sens de la rotation, tient, contre lui, un objet M de

masse m. Cet objet décrit donc, autour de l'axe O, un cercle de rayon r.

La vitesse angulaire étant a (on l'exprime en radians par seconde, soit 6,28 fois le nombre de tours par seconde), l'objet est soumis à la force centrifuge, qui tend à l'écartier de l'axe, la force étant :

$$f_1 = m a^2 r$$

La vitesse de déplacement de l'objet M est $v_1 = a r$. Supposons que, maintenant, l'homme étende son bras, radialement, vers l'extérieur, pour amener l'objet M à une distance $R > r$ de l'axe.

L'objet doit alors avoir une nouvelle vitesse $v_2 = a R$, plus grande que v_1 . Donc, on doit augmenter la vitesse de M, ce qui suppose qu'on lui applique une force dirigée comme le vecteur vitesse V_1 . Et, comme tout corps doué de masse, il réagit par sa « force d'inertie ». Donc, lorsque l'homme écarte

M de l'axe, il a l'impression que M est poussé vers l'arrière par une force d'autant plus grande que la vitesse avec laquelle il écarte M est élevée et que la vitesse de rotation a est grande.

C'est cette force que l'on nomme « force de Coriolis ». C'est elle qui explique les réactions apparemment paradoxales d'un gyroscope qui tourne. On sait que, dans ce cas, si l'on essaye de modifier la direction de l'axe de rotation, le gyroscope réagit dans une direction perpendiculaire à la force appliquée.

Imaginez que, par exemple, vous portez dans vos bras repliés un moteur qui, lancé, tourne toujours par son élan. Si vous marchez dans un couloir rectiligne, rien ne se passe. Mais si vous devez, par exemple, tourner vers la gauche, vous allez sentir le moteur « se cabrer », le côté de l'axe qui est à votre gauche ayant tendance à monter, celui qui est à votre droite tendant à descendre. Ce sera le contraire si vous tournez vers la droite.

Emploi du gyroscope

Le capteur de vitesse ultra-sensible qui utilise le gyroscope est réalisé comme l'indique la figure 8. Le volant du gyroscope est V, son axe A. Les pivots de cet axe sont fixés sur un anneau, la « cage » du gyroscope, C, elle-même supportée par un axe A', pouvant tourner par rapport aux deux bouts d'une fourche F.

On fait tourner le tout autour

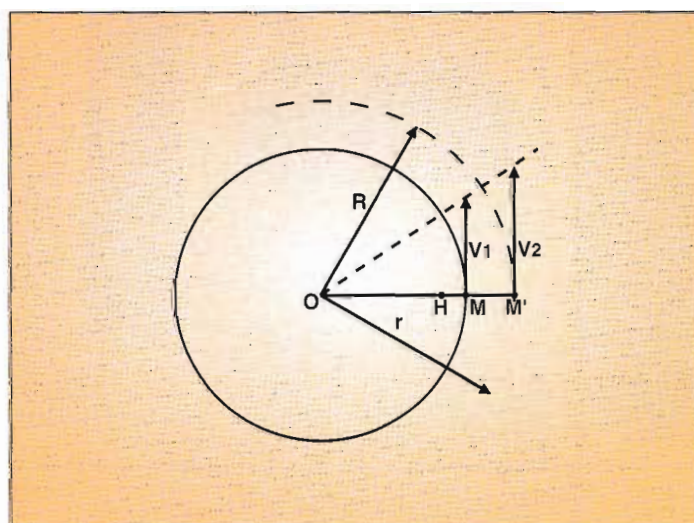


Fig. 7 - Un homme H, debout sur le plateau tournant d'un manège, tient une masse M animée d'une vitesse tangentielle V_1 . S'il l'écarte brusquement, pour amener la masse à la vitesse V_2 , une force d'inertie se manifestera : nous avons mis en évidence la « force de Coriolis ».

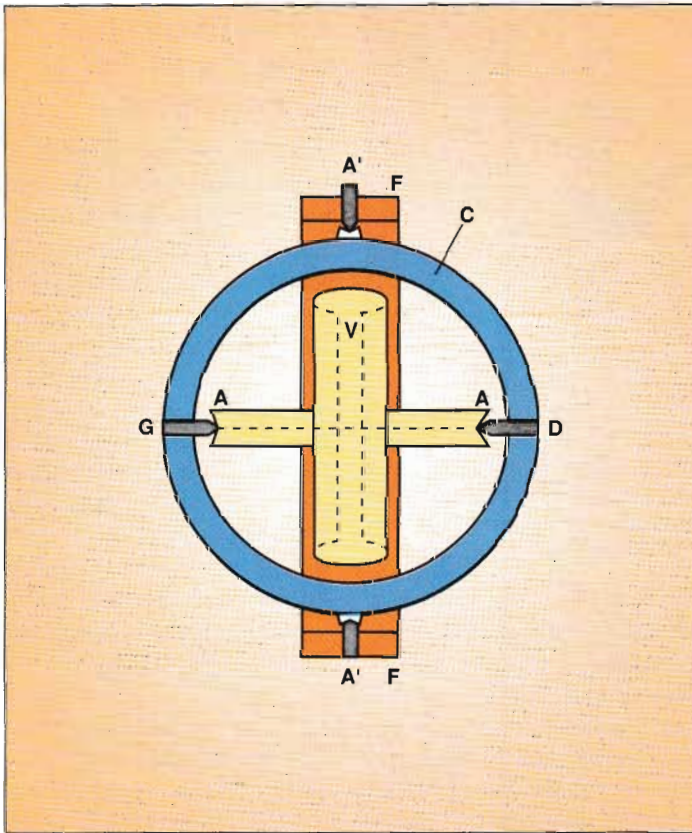


Fig. 8. - Le gyroscope d'axe A, ayant un volant V, est supporté par une cage C, pouvant elle-même pivoter autour d'un axe A' (perpendiculaire à A) par rapport à une fourche F, dont l'axe de rotation est perpendiculaire à A et à A'. Quand la fourche tourne (même très lentement), la force de Coriolis fait, par exemple, monter D et descendre G.

d'un axe vertical, perpendiculaire au plan du dessin, ce qui provoque, de la part du gyroscope, une réaction, tendant, par exemple, à faire monter le point D et descendre le point G. Ces points sont réunis à la fourche par des capteurs de force, qui indiquent le couple avec lequel le gyroscope réagit, donc la vitesse (très faible) à laquelle tourne la fourche F.

On utilise de tels capteurs quand on doit stabiliser une rotation extrêmement lente, comme celle d'un télescope autour de son axe équatorial (un tour en 23 h 56 mn).

Le comptage

Nous en arrivons aux capteurs de vitesse numériques. Il vient très logiquement à l'idée de lier à l'axe qui tourne un système envoyant un certain nombre

d'impulsions par tour et de mesurer la fréquence de ces impulsions, et c'est, en effet, un moyen très utilisé pour la mesure d'une vitesse de rotation.

La méthode la plus rudimentaire pour produire un top par tour consiste à placer sur l'arbre qui tourne un aimant et à utiliser le champ magnétique de ce dernier pour provoquer, à chaque tour de l'axe, la fermeture d'un petit interrupteur à lames souples (ILS ou « reed »). Les lecteurs connaissent bien ces petits tubes de verre où sont scellées deux lames souples magnétiques. En approchant un aimant, comme les lignes de force du champ se referment par les lames, celles-ci se touchent et établissent un contact.

L'application la plus courante de ces interrupteurs est la réalisation des systèmes d'alarme anti-intrus. On fixe un aimant

sur chaque porte (ou fenêtre) et un ILS sur la partie fixe (chambranle de la porte ou cadre de la fenêtre). L'ouverture de la porte (ou de la fenêtre), éloignant l'aimant de l'ILS, provoque l'ouverture du contact et le déclenchement de l'alarme.

Le système que nous venons de décrire a été utilisé pour les roues de bicyclettes. Malgré son côté rudimentaire, il fonctionne correctement parce que les ILS sont prévus pour supporter plusieurs millions de manœuvres. Le problème qui se pose alors est de bien interpréter les signaux.

D'abord, il faut éliminer les rebondissements du contact, mais c'est là une difficulté que tous les utilisateurs de contacts divers (les claviers, entre autres) savent bien résoudre. Ensuite, la fréquence du signal est faible. La circonférence d'une roue de bicyclette étant proche de 2 m, il y a un peu moins de 3 tops par seconde quand on roule à 20 km/h.

Pour des fréquences aussi basses, il est presque indispensable de passer par la mesure de la période, laquelle donne une valeur inversement proportionnelle à la vitesse. On doit donc faire une conversion période-fréquence au moyen d'une petite calculatrice incorporée.

Méthodes optiques

Pensant à la fatigue et à l'usure d'un contact, on a normalement l'idée de lier à l'axe un disque (fig. 9) comportant des fentes (ou des zones transparentes séparées par des zones opaques), pour interrompre, n fois par tour, le passage d'un rayon lumineux entre une source de lumière S et une diode photosensible D.

Cela se fait, et il s'agit là d'un système très avantageux car il n'introduit aucun freinage sur l'axe qui porte le disque. En plus, on peut faire en sorte que le disque comporte un grand nombre de fentes, ce qui fait que, même pour une vitesse de rotation relativement lente, la fréquence du signal fourni par la diode photosensible est élevée, ce qui facilite la mesure de sa fréquence.

Un usage assez fréquent consiste à prévoir 60 fentes pour un tour, ainsi, en comptant les tops par seconde, on obtient la vitesse de rotation en tours par minute, unité très utilisée par les mécaniciens.

Quand vous prenez de l'essence dans une station-service, c'est, très souvent, un système de ce genre qui affiche le nombre (trop élevé) de francs que vous devez payer. L'axe qui entraîne le disque est com-

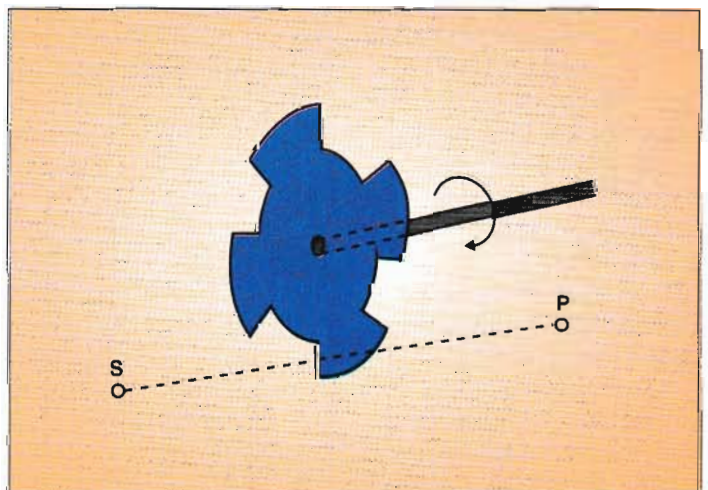


Fig. 9. - On constitue un bon capteur de vitesse en plaçant un disque avec des fentes entre une source de lumière S et une diode photosensible P.

mandé par une « anti-pompe », pourrait-on dire, puisqu'il s'agit d'une sorte de pompe réversible dans laquelle on fait passer le liquide, ce qui entraîne la rotation de son axe.

Un alternateur rudimentaire

Un autre moyen pour convertir une vitesse de rotation en fréquence consiste à utiliser un petit alternateur entraîné par l'axe étudié. On peut les réaliser d'une façon extrêmement simple, comme l'indique la figure 10. Notre alternateur se compose simplement d'un aimant droit, NS, fixé perpendiculairement à l'axe A, dont les pôles passent près d'un bobinage B. A chaque tour, on induit donc dans ce bobinage deux tops, un positif et un négatif.

Le système est donc très simple, mais il a un inconvénient : la fréquence du signal est proportionnelle à la vitesse de rotation, ce qui est bien, mais son amplitude l'est aussi, ce qui est moins bien. Autrement dit, à fréquence faible, l'amplitude des signaux devient très petite. On doit donc utiliser, pour amplifier les signaux produits, un amplificateur dont le gain augmente quand la fréquence diminue, ce qui se fait très bien, mais on doit quand même se limiter au-dessus d'une fréquence donnée.

Il y a bien des cas où une telle limitation est sans inconvénient : par exemple, pour la mesure des vitesses de rotation des turboréacteurs, mais il peut arriver que cet inconvénient (que ne représentait pas le système optoélectronique de la figure 9) soit gênant.

On peut alors remplacer l'alternateur par un « détecteur de proximité ». Il s'agit d'un ensemble électronique qui indique, par un signal, si la distance qui sépare une pièce

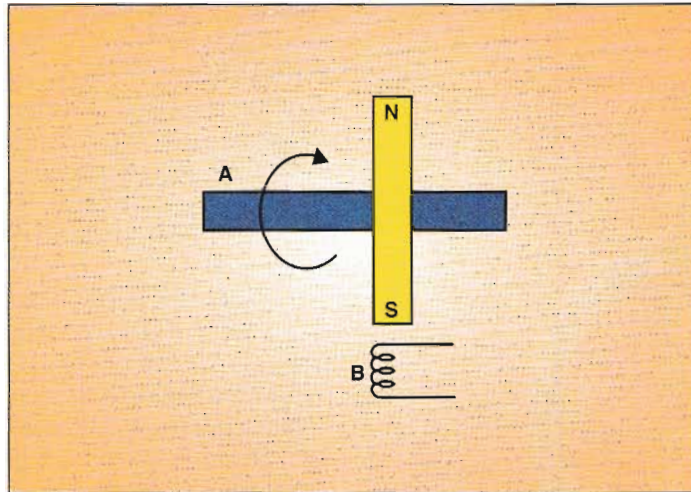


Fig. 10. — On peut aussi, pour une mesure numérique d'une vitesse de rotation, utiliser un alternateur simplifié : un aimant NS tournant devant un bobinage B.

métallique et un bobinage est inférieure, ou non, à un certain minimum.

On le réalise généralement en constituant, avec le bobinage, un oscillateur. Quand on approche une pièce métallique du bobinage, les courants de Foucault prenant naissance dans cette pièce provoquent un amortissement du circuit oscillant. A une distance donnée de la pièce, cet effet est suffisant pour faire cesser l'oscillation.

Le circuit intégré TCA 475 est prévu pour cela : on lui associe un bobinage et un condensateur extérieurs, et il donne un signal logique (zéro ou un) suivant la position d'une pièce métallique proche du bobinage.

De tels capteurs de proximité sont très utilisés dans la technique automobile pour dé-

clencher l'allumage quand l'arbre à cames passe dans une position donnée. On les a préférés aux systèmes optoélectroniques, car la source de lumière supporte généralement mal les vibrations et les chocs auxquels tout équipement d'électronique automobile doit être particulièrement insensible. En outre, toute arrivée d'huile pourrait gêner le passage de la lumière.

Donc, en remplaçant, dans l'ensemble de la figure 10, l'aimant NS par une simple barre métallique, la bobine faisant partie d'un détecteur de proximité, on obtient deux tops par tours, ces tops ayant une amplitude constante, quelle que soit la vitesse de rotation de l'axe. Si l'on place sur l'axe un disque comportant n « dents » comme celui de la figure 9, on peut avoir n tops par tour.

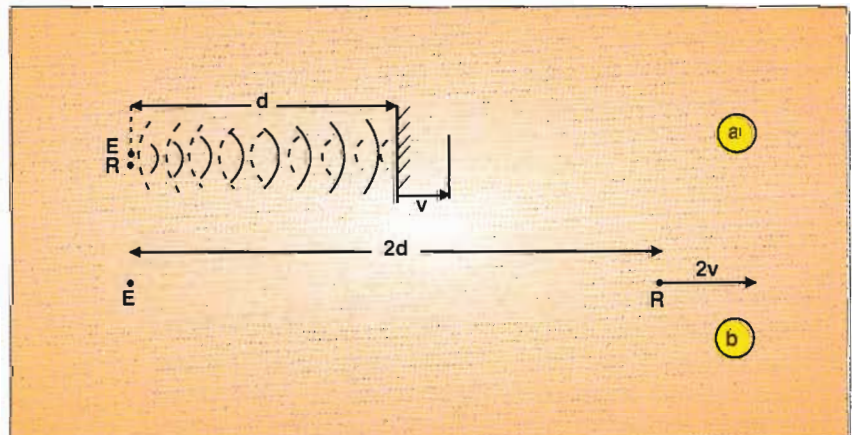
Utilisation de l'effet Doppler

Un autre moyen de mesure de la vitesse consiste à utiliser un « effet » particulier. Il paraît que les physiciens aiment tellement cette qualification de « effet Machin » pour désigner les phénomènes physiques que certains parlent d'« effet Newton » pour désigner la pesanteur ou d'« effet Archimède » lorsqu'il s'agit de l'allègement d'un corps plongé dans l'eau. Ici, notre « effet » est la variation de fréquence du son, de la lumière ou des ondes radio, quand l'oscillation correspondante est réfléchie par un objet mobile.

La figure 11 montre comment on peut calculer cette variation. Nous supposons (fig. 11a) une source E, émettant, par exemple, un son de fréquence F , qui se propage à une vitesse V . Le son atteint une paroi située à une distance d de E, se réfléchit et revient à un récepteur R, très près de E. La paroi est en mouvement à une vitesse v , en direction de E et R.

Tout se passe donc exactement comme si le signal de la source E (fig. 11b) atteignait le récepteur R situé à une distance $2d$. Mais, puisque la distance d diminue à la vitesse v , tout se passe donc comme si, sur la figure 11b, le récepteur R était animé d'une vitesse $2v$.

Fig. 11. — Une source E, très proche d'un récepteur R, envoie un signal qui se réfléchit sur une paroi à la distance d , animée d'une vitesse v et revient en R (a). Le phénomène est le même que si le signal allait de la source E au récepteur R à la distance $2d$ (b), le récepteur étant animé de la vitesse $2v$.



Si $v = 0$ (paroi immobile), la fréquence F' du signal reçu par R est, évidemment, égale à F . Mais si v n'est plus nulle, voyons ce qui se passe en une seconde.

La source a émis F oscillations, chacune correspondant à une longueur d'onde $\delta = V/F$. Il y a donc, sur la figure 11b, un nombre $N = 2d/\delta$ de longueurs d'ondes « en voyage » entre E et R. Pendant une seconde, la distance $2d$ a diminué de $2v$. Le récepteur va donc recevoir, en plus des F périodes d'oscillation, le « supplément » f , correspondant aux ondes qu'il a « croisées en chemin ».

Il a parcouru, en une seconde, une distance $2v$, dans laquelle il y a $2v/\delta$ longueurs d'ondes. Le « supplément » f , correspondant aux ondes « ramesées en route », est donc :

$$f = 2v/\delta = 2v F/V$$

La fréquence F' reçue par R est donc :

$$F' = F + f = F(1 + 2v/V)$$

Des ordres de grandeur

S'il s'agit d'un son se propageant dans l'air à une vitesse V proche de 340 m/s, on voit que, à une vitesse v de 1,7 m/s (6,12 km/h) correspond une augmentation de fréquence de 1 %.

Pour une onde radioélectrique, qui va, en gros, 880 000 fois plus vite (3.10⁸ m/s environ), la variation relative de fréquence sera bien plus faible. Si un objet se déplace à 45 m/s (162 km/h), la variation de fréquence ne sera que 3.10⁻⁷. Cela suffira cependant à un agent pour dresser un procès verbal à l'automobiliste qui joue le pilote de formule 1 sur l'autoroute.

En effet, on apprécie souvent la variation de fréquence en réalisant un battement entre la fréquence émise et la fréquence reçue. Le plus souvent, cela se fait tout seul, car, de-

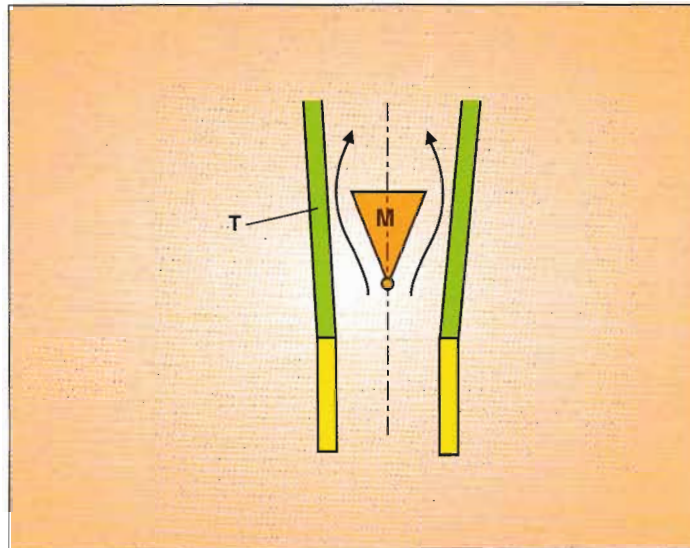


Fig. 12. - Capteur de débit constitué par une sorte de toupie M que le flux du liquide montant dans le tube conique T fait monter plus ou moins haut.

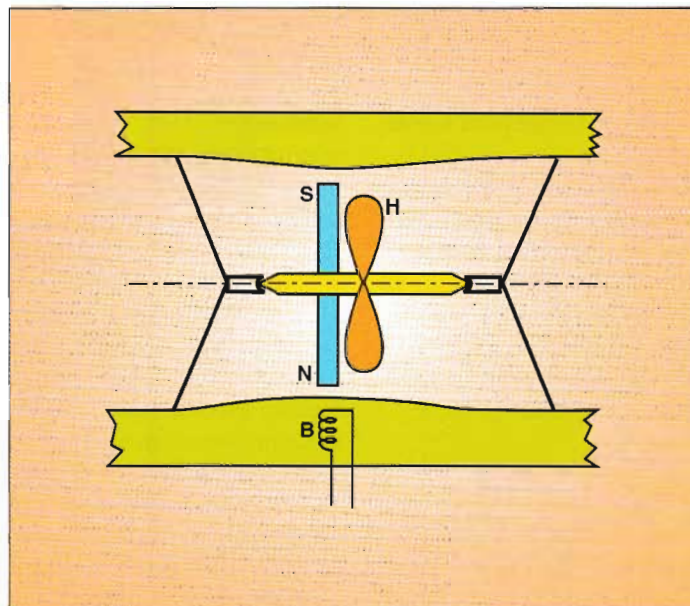


Fig. 13. - Capteur de débit utilisant une petite hélice qui commande un alternateur.

puis l'émetteur E vers le récepteur R, il y a souvent, en plus de la paroi mobile de la figure 11, des objets fixes qui renvoient au récepteur des signaux à fréquence F . Le récepteur recevra donc un signal à fréquence F et un autre à fréquence F' .

On va donc, dans l'onde reçue, percevoir une modulation d'amplitude à la fréquence $F - F' = F.2v/V$. C'est cette modulation que l'on détecte dans les systèmes d'alarme anti-intrus utilisant des ultrasons (souvent à 36 kHz). Nous avons vu qu'un mobile se dé-

plaçant à 1,7 m/s renvoie une fréquence augmentée de 1 %, soit 360 Hz, s'il s'agit d'une source ultrasonore à 36 kHz. Donc, si l'on détecte tout battement d'une fréquence supérieure à 10 Hz, on repérera la présence de tout mobile dépassant la vitesse de 4,7 cm/s. On peut utiliser une source ultrasonore placée sous un véhicule, près du sol, envoyant l'essentiel de son rayonnement vers l'avant, en direction légèrement plongeante. En utilisant le battement qui apparaît, on peut ainsi mesurer la vitesse du véhicule. La réalisation

d'un tel capteur de vitesse est cependant assez délicate, car le faisceau ultrasonore se disperse un peu.

On reçoit donc des échos dans des directions légèrement biaisées par rapport au mouvement du véhicule. Ces échos donnent un battement correspondant à une vitesse un peu moindre. Il faut alors disposer d'un ensemble de traitement de signal assez complexe pour « extraire » des différents battements celui qui a la fréquence maximale.

Vitesse d'un gaz ou d'un liquide

La mesure des débits de fluides (liquide ou gaz) est très importante dans l'industrie. Nous avons déjà évoqué le problème du compteur de volume pour l'essence utilisant une « pompe doseuse ». On peut aussi employer d'autres méthodes.

Il y a, bien sûr, tous les appareils classiques de mesure de débit (ou « débitmètres ») de l'industrie, que l'on peut modifier pour qu'ils fournissent un signal électrique. Nous citerons parmi eux le système du tube conique, qu'illustre la figure 12. Le liquide à contrôler passe dans un tube conique vertical en verre, T, dans lequel se trouve une petite pièce mobile M, lestée en bas.

Plus le débit de liquide est important, plus la pièce est refoulée vers le haut, pour laisser un passage plus large entre M et le tube T. Pour éviter que la pièce mobile ait tendance à coller sur la paroi du tube T, on la munit de cannelure en hélice, qui font que, quand le fluide passe, la pièce se met à tourner autour de son axe, égalisant le flux de liquide tout autour d'elle, empêchant toute adhérence au tube.

La hauteur de la pièce est fonction du débit, et il est facile de transformer cette hauteur en

signal électrique, par un système photoélectrique, par exemple, ou par la variation du coefficient de self-induction d'un bobinage entourant le tube T en fonction de la position de M.

Un autre système très employé dans l'industrie consiste à faire passer le fluide dans un « Venturi » (un ajutage convergent-divergent), qui provoque, entre la partie en amont de l'ajutage et celle qui est en aval, une différence de pression fonction du débit. Mais il ne s'agit pas d'une loi linéaire.

Un petit moulinet

Un autre moyen, très utilisé, consiste à faire passer le liquide dans un ajutage de Venturi (fig. 13) où se trouve une petite hélice H qui tourne à une vitesse proportionnelle à la vitesse du liquide. L'axe de l'hélice porte un aimant droit NS, induisant une tension alternative dans une bobine B, logée dans la paroi du Venturi. La fréquence de cette tension est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du liquide dans le Venturi.

Un tel capteur est excellent, parfaitement linéaire, permettant un étalonnage précis. Il faut toutefois faire très attention quand on l'utilise dans l'industrie sur une canalisation d'eau, par exemple.

En effet, surtout si cette canalisation peut être démontée et remontée, il est possible qu'elle comporte de longues bulles d'air. Or, quand une telle bulle arrive, sous l'effet de la pression de l'eau qui est derrière, le passage de la bulle d'air se fait très vite et l'eau arrive ensuite avec la « légèreté » d'un marteau : il est alors à craindre que la pauvre petite hélice soit détruite, arrachée et balayée par le torrent d'eau. Tout le monde connaît ces « coups de bélier » que l'on note dans un robinet, quand la canalisation

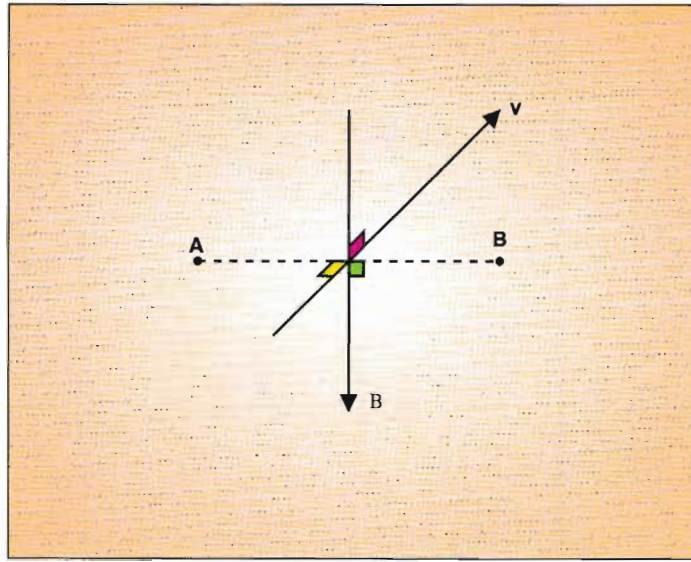


Fig. 14. - Quand un milieu conducteur se déplace à la vitesse v , perpendiculairement à une induction magnétique B , il y a production d'une tension entre deux points A et B (AB est perpendiculaire à v et à B). C'est l'effet Faraday, utilisé dans les lochs électroniques entre autres.

a dû être vidangée pour une réparation.

Or la destruction du capteur est une très mauvaise plaisanterie vu qu'un tel engin est très cher. Il faut alors prévoir, en amont du capteur, tout un système hydraulique d'élimination des bulles, système complexe et coûteux.

Où l'on retrouve la loi de Faraday

Un autre capteur de vitesse de liquide utilise ce que l'on nomme « effet Faraday ». Ledit effet consiste en l'apparition d'une différence de potentiel entre deux points A et B (fig. 14) quand un liquide conducteur se déplace avec une vitesse v , perpendiculairement à une induction magnétique B . La direction AB est perpendiculaire à l'induction et à la vitesse.

C'est cette méthode que l'on utilise pour le « loch électronique » qui équipe certains bateaux de plaisance. Sur le bord de la coque, un aimant crée l'induction magnétique dans la mer et deux électrodes, affleurant la coque, recueillent la

tension produite. Cette tension est proportionnelle à l'induction B (que l'on maintient constante) et à la vitesse v .

Il faut donc, en principe, que le liquide soit conducteur. Quand il s'agit d'eau de mer, pas de problème. Mais l'auteur se rappelle avoir utilisé un tel capteur avec de l'eau de ville ordinaire (mauvais isolant) et obtenu d'excellents résultats. Pour vérifier l'étalonnage du capteur, on avait fait passer près d'un mètre cube d'eau en comptant les impulsions qui sortaient du capteur. En effet, ce dernier comporte toute une électronique fort complexe qui, à partir de la tension (très faible) entre A et B, fournit des tops dont la fréquence est proportionnelle à cette tension. Le résultat fut excellent, parfaitement conforme aux indications du constructeur. On eut alors l'idée de faire passer dans le capteur de l'eau désionisée (très pure, pratiquement pas conductrice). Le capteur aurait dû se mettre en panne, mais il « ne savait pas qu'il aurait dû le faire » et le résultat fut encore très bon. Probablement, il restait un tout petit peu de conductibilité dans l'eau, et si l'on avait essayé avec

de l'essence ou de l'huile (excellents isolants), cette fois, la mesure aurait échoué.

Le système avec une hélice, représenté sur la figure 13, convient parfaitement aux liquides isolants.

Pour conclure

Nous préciserons d'abord un point : dans tout ce qui précède, nous avons toujours considéré une vitesse linéaire le long d'un axe droit, ou une vitesse angulaire de rotation autour d'un axe fixe.

Dans tous ces cas, la vitesse s'exprime simplement par un nombre. Mais il ne faut pas oublier que la vitesse d'un mobile n'est pas une grandeur dite « scalaire ». En effet, ce nom est réservé aux grandeurs que l'on exprime uniquement par une valeur, sur une échelle de valeurs (échelle = « scala » en latin). Une densité, une masse sont des grandeurs scalaires, mais, pour définir une vitesse, il nous faut d'autres précisions que sa valeur arithmétique.

Il faut, en plus, savoir dans quelle direction le mobile va. Donc, on doit représenter la vitesse par un vecteur, c'est-à-dire une flèche, avec une origine (le point qui se déplace), une direction (celle dans laquelle il va) et une longueur (la valeur arithmétique de la vitesse). Donc, en réalité, il nous faut trois nombres pour caractériser une vitesse.

Quand on veut connaître parfaitement la vitesse d'un mobile, il nous faut donc utiliser plusieurs capteurs (au moins trois), mais ce que nous avons dit reste valable.

Enfin, nous devons avouer que le sujet est bien loin d'être épuisé. Il y a d'innombrables capteurs de vitesse dont nous n'avons pas parlé ici, le but de cet article étant de présenter aux lecteurs l'idée générale du sujet.

J.-P. Ehmichen