

Mesures de vitesses et de débits par la méthode électromagnétique.

Choix des matériels industriels

PAR

J. Ch. Demagny

Ingénieur

Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France

Généralités

L'idée de la mesure des vitesses dans les fluides conducteurs par la méthode électromagnétique est ancienne puisqu'elle revient à Faraday, qui tenta sans succès de mesurer la vitesse d'écoulement de la Tamise en utilisant la composante verticale du champ magnétique terrestre.

Durant une longue période ce principe ne trouva aucune application, mais il fut pris de nouveau en considération lorsque les techniques d'amplification et de mesure des faibles tensions eurent atteint un développement suffisant.

On observa d'abord l'application de montages spéciaux destinés à effectuer des mesures réputées impossibles (vitesse du sang dans les veines et les artères), puis la mise en service de matériels industriels peu fiables et enfin, après une période de stabilisation, la production en série de matériels sûrs et robustes. Récemment l'évolution générale des techniques de l'électronique a apporté une large contribution à la progression de la qualité de ces montages.

Il existe actuellement des appareils disponibles dans le commerce permettant de résoudre des problèmes de mesure et d'asservissement de débit dans de bonnes conditions de prix de revient et de fiabilité.

Certains constructeurs commencent à présenter des montages capables de mesurer des vitesses locales dans une veine liquide en mouvement.

Le principe de la mesure électromagnétique ne s'applique qu'aux liquides dont la conductibilité électrique est supérieure à 1 microhm/cm, ce qui englobe toutes les eaux naturelles, les eaux usées et de nombreux mélanges chimiques, mais qui exclut les huiles de graissage, les essences, les fuels et aussi les eaux de très grande pureté (eaux de chaudières).

Cette méthode a de grandes qualités, mais aussi des limites. Elle permet de mesurer des débits dans des canalisations, sans aucune perte de charge ; elle accepte les transports solides (vase, sable, cailloux, débris divers). Elle donne accès, si on le désire, aux fluctuations de vitesse et de débit.

Elle assure, de manière linéaire, la mesure du débit instantané, mais conduit aisément au débit cumulé en supportant assez bien des profils de vitesses peu homogènes (présence de coudes et de vannes).

En revanche, la précision ne dépasse pas 0,5 %, un étalonnage est presque toujours nécessaire soit à l'achat, soit sur le site, et il est souhaitable de le renouveler périodiquement (1 ou 2 ans).

Les débitmètres électromagnétiques peuvent rendre de grands services s'ils sont utilisés dans de bonnes conditions.

Cette étude se propose de mettre à disposition des informations pour permettre à tout ingénieur non spécialisé d'envisager l'utilisation d'appareillage de cette conception.

Etude de la mesure

Principe de base⁽¹⁾

Nous savons que tout conducteur en mouvement dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice induite qui s'écrit :

$$E = K d\Phi/dt.$$

Un liquide se déplaçant dans un champ magnétique au contact de deux électrodes fixes produit de la même manière une force électromotrice induite disponible sur ces électrodes et représentative de sa vitesse instantanée.

Ce principe conduit à la réalisation de différents capteurs permettant de mesurer les vitesses et les débits des fluides conducteurs. Le débitmètre électromagnétique, dispositif le plus courant, assure la mesure d'un débit dans une conduite fermée ; d'autres montages permettent les mesures locales de vitesses dans des fluides en mouvement.

Nous décrirons, plus particulièrement, les premiers dont la compréhension amène plus naturellement la description des dispositifs spéciaux.

Un débitmètre électromagnétique se compose de :

- un tube à parois intérieures isolantes dans lequel circule le fluide,
- un circuit magnétique produisant un champ perpendiculaire à l'axe du tube,
- une paire d'électrodes situées aux extrémités d'un diamètre perpendiculaire aux lignes de forces du champ magnétique.

En première approximation la tension induite s'écrit :

$$E = KHLV$$

H : exprime l'intensité du champ magnétique,

L : la distance entre les électrodes soit un diamètre,

V : la vitesse du fluide,

K : représente un coefficient se rapportant au système d'unités choisi.

En prenant les unités : cm, cm/s, oersted, $K = 10^{-8}$; avec le système international (m, m/s, tesla), $K = 1$.

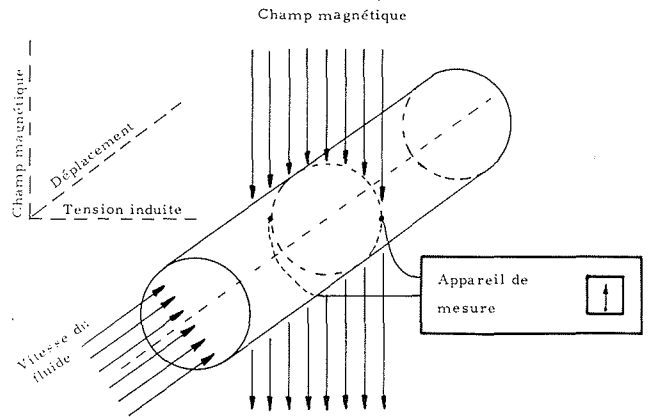
Dans les réalisations courantes, les champs magnétiques, du fait de l'importance de l'entrefer, dépassent rarement une centaine d'oersted, ce qui conduit à des tensions de mesure de l'ordre du millivolt pour une vitesse de 1 m/s.

Le principe électromagnétique permet aussi de réaliser des capteurs de vitesse utilisables dans une veine liquide étendue (canal, rivière) ou au voisinage d'une paroi (coque de navire). L'imagination des constructeurs se donne alors

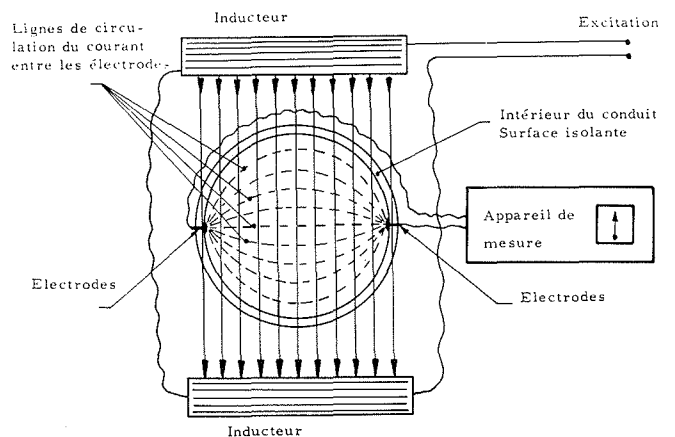
(1) Cette formulation élémentaire convient aux usages courants. Pour une étude plus rigoureuse le lecteur pourra se reporter à :

"Mesures électromagnétiques des vitesses dans les liquides" G. Réménieras et C. Hermant, *La Houille blanche*, n° spécial B/1954

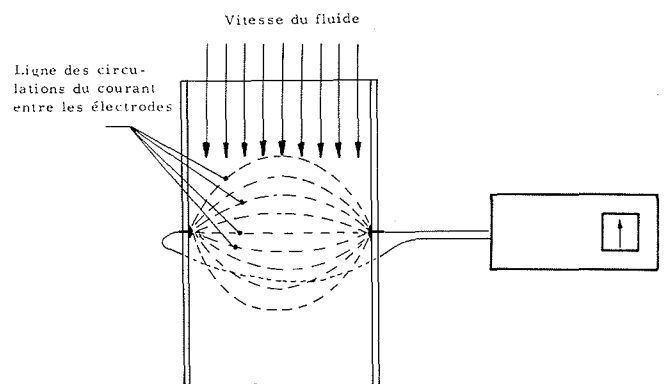
"Ecoulements fluides soumis à un champ magnétique" Paul Blanc-Féraud, *Bulletin du Centre d'Etudes et Recherches de Chatou*, Supplément n° 1 - 1962.



1/



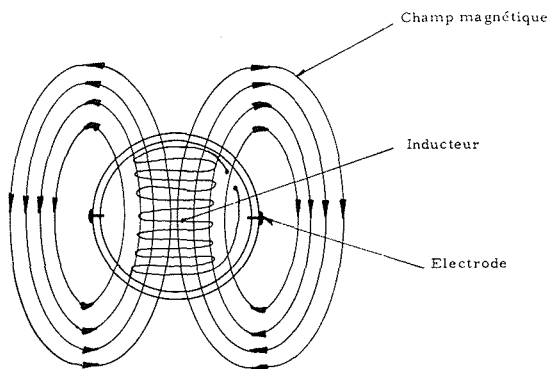
2/



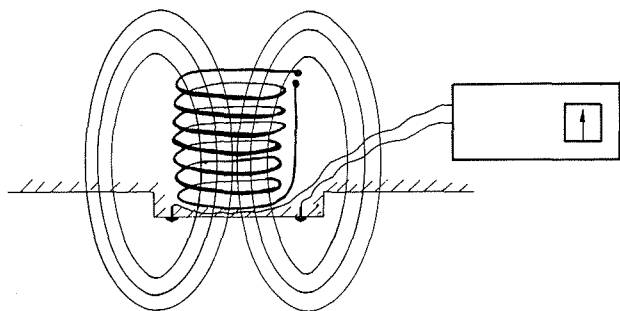
3/

libre cours pour obtenir un montage dans lequel le trièdre trirectangle : vitesse, champ magnétique, tension, se trouve respecté. Les figures 4 et 5 reproduisent deux exemples.

Ces capteurs particuliers sont cependant mal protégés contre les tensions provenant des courants vagabonds et telluriques. Certains utilisateurs préfèrent un petit débitmètre court, caréné en forme de tuyère de manière que la vitesse dans le canal intérieur soit très voisine de la vitesse extérieure.



4/ Capteur de vitesse en milieu étendu



5/ Capteur de vitesse sur une paroi

La mesure du débit dans une conduite s'acquiert soit par l'intermédiaire de la détermination du champ magnétique conduisant à la vitesse moyenne que l'on applique sur la section, soit directement par étalonnage, cette dernière méthode est préférable.

Le débitmètre électromagnétique possède l'avantage d'être peu sensible aux variations du profil des vitesses. Lorsque le champ magnétique est uniforme dans un volume délimité par deux plans orthogonaux à l'axe du tube et éloignés d'une distance d'un rayon en amont et aval du diamètre reliant les deux électrodes, la tension de mesure est représentative du débit global de la conduite quelle que soit la variation du profil des vitesses, si ces profils conservent la forme d'une figure de révolution autour de l'axe du tube.

Certains constructeurs peuvent fournir des débit-mètres insensibles à des profils plus perturbés en utilisant des champs magnétiques judicieusement définis, avec éventuellement des formes particulières d'électrodes.

Le bien fondé de ces prétentions doit toujours être vérifié.

Tensions parasites

Ce principe de mesure conduit aussi bien à l'utilisation de champs magnétiques continus qu'alternatifs, les tensions de mesure recueillies étant de même nature.

Actuellement l'excellente qualité des aimants permanents incite à l'utilisation d'un champ continu, mais pour les mesures dans les liquides ionisés, ce qui représente le cas le plus fréquent, on constate la présence de tensions parasites dues à la polarisation des électrodes et à des déséquilibres ioniques dans leur voisinage.

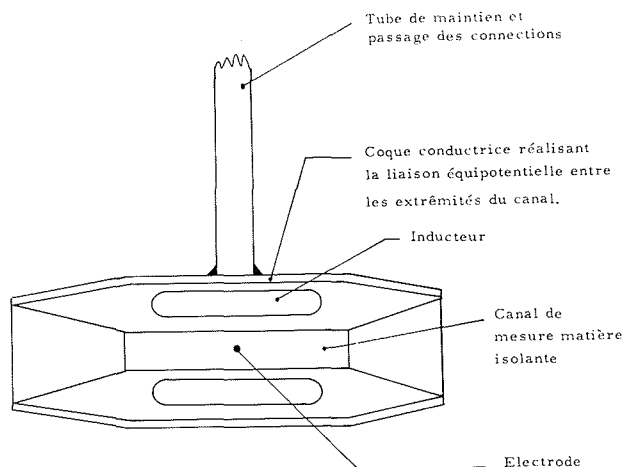
L'existence de ces tensions évolutives, pouvant dépasser dix fois la valeur de la tension de mesure, condamne ce montage qui ne peut être envisagé que pour les métaux liquides.

L'utilisation d'un champ alternatif évite cet inconvénient, mais introduit de nouvelles tensions parasites dues aux couplages inductifs, capacitifs et résistifs entre le circuit d'excitation et le circuit de mesure. Les constructeurs de débitmètres électromagnétiques connaissent bien ce problème, mais ils restent généralement discrets sur les technologies qu'ils utilisent : soins particuliers apportés à la réalisation du capteur, dispositifs spéciaux inclus dans l'appareillage associé.

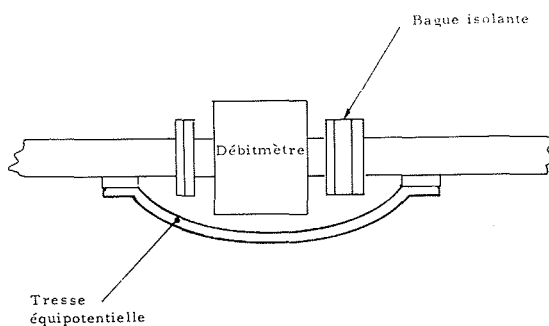
En conséquence, un débitmètre électromagnétique doit toujours être monté avec l'appareillage complémentaire du même constructeur.

Des tensions parasites existent aussi quelquefois de par la présence de champs électriques continus ou alternatifs au sein même du fluide, qui trouvent leurs origines dans les courants de retour de masse des alimentations en 50 Hz, les courants de protection cathodique des canalisations enterrées, ou les courants telluriques.

On évite assez aisément ces perturbations en établissant une liaison équipotentielle entre les deux extrémités du capteur afin d'empêcher la circulation de ces courants à l'intérieur du tube de mesure (figure 7).



6/ Tuyère électromagnétique



7/ Protection contre les courants vagabonds

Dispositions pratiques

Champs magnétiques

On utilise des champs magnétiques alternatifs pour les raisons citées ci-dessus (tensions parasites). Le couplage magnétique entre le circuit d'excitation et le circuit de mesure, induit dans ce dernier une tension proportionnelle à la fréquence et en quadrature avec le champ :

$$\text{Si } \Phi = A \sin \omega t \quad d\Phi/dt = A\omega \cos \omega t$$

d'où l'intérêt d'utiliser une fréquence aussi basse que possible.

De nombreuses réalisations choisissent le réseau à 50 Hz pour des raisons pratiques de simplicité de l'alimentation. Des montages spéciaux utilisent des fréquences de 30, 25, 12, 5 Hz.

Cette constatation fait apparaître l'intérêt d'un champ magnétique non distordu, car les fréquences harmoniques : 2F, 3F, 4F. . . . se retrouvent induites dans le circuit de mesure avec des coefficients d'application égaux au chiffre de leur rang.

L'importance des entrefers et l'intensité modeste des champs couramment utilisés ne conduisent pas à des difficultés au sujet de ces distorsions, sauf pour les dispositifs à aimants tournants dans des montages du genre de celui de la figure 4.

Les couplages capacitifs et résistifs entre le circuit d'excitation et le circuit de mesure sont efficacement combattus par l'établissement d'un blindage autour des bobinages, voire d'un second blindage autour du câblage des électrodes. Ces précautions sont malheureusement souvent négligées par les constructeurs.

L'homogénéité du champ se réalise assez bien sur les débitmètres de faibles dimensions (Φ inférieur à 200 mm). Les grandes tailles conduisent (Φ supérieur à 1 m) à des inducteurs complexes utilisant des compensations diverses.

Il faut regretter que les difficultés d'étalonnage augmentent avec les dimensions du capteur, car c'est justement dans le cas des grands capteurs que la vérification de la fidélité, quelque soit le profil des vitesses, est la plus souhaitable.

Electrodes

La nature du métal des électrodes doit être adaptée au fluide utilisé; pour les eaux naturelles on adopte fréquemment l'acier inoxydable.

Les constructeurs proposent aux industries chimiques des électrodes en Hastelloy, Monel, Platine. . . Leur forme revêt une certaine importance du fait de l'effet autonettoyant du frottement du fluide, car lorsqu'un côté de l'électrode (aval ou amont) se recouvre de dépôt isolant la répartition des lignes de courant électrique dans le fluide s'en trouve modifiée, la figure de la boucle induite dans le champ magnétique est différente et la tension parasite induite change.

Pour la même raison, on veillera à ce que les risques d'encrassement soient identiques pour les deux électrodes, ce qui conduit dans une conduite horizontale à placer ces électrodes de manière que la ligne qui les joint soit aussi horizontale.

Lorsque les risques de salissure deviennent trop importants (entraînement de matières grasses), certains fabricants proposent des électrodes démontables ou des dispositifs de nettoyage automatique.

Tube

Les débitmètres électromagnétiques existent dans toutes les dimensions standard depuis des diamètres de 10 mm jusqu'à 3 mètres. Cependant les appareils de grandes dimensions deviennent onéreux et leur précision diminue. On conseille généralement de choisir le diamètre de manière que la vitesse du fluide au débit maximale soit supérieure à 1 m/s ; cette condition permet d'assurer un bon rapport signal/bruit.

La matière permettant l'isolement intérieure du tube est choisie en tenant compte de l'agressivité chimique et mécanique du fluide. Les produits proposés sont les suivants : néoprène, rilsan, téflon, penton, nylon, polyuréthane, émail, verre.

Détection

C'est dans ce domaine que les constructeurs montrent le plus d'originalité.

Il convient toujours d'examiner une chaîne dans son ensemble, car des réalisations se permettent des simplifications qui sont compensées par ailleurs. Nous attirerons cependant, l'attention sur des points importants.

Le préamplificateur devrait être placé à proximité immédiate du capteur, voire à l'intérieur même de celui-ci. Cette solution conduit aux meilleures performances avec les liquides de faible conductivité et permet d'augmenter la longueur du câble entre le point de mesure et le détecteur conditionneur de signaux. Très peu de constructeurs choisissent cette formule ou ne la prévoient que sous forme d'option pour les cas particuliers.

L'élimination de la tension parasite en quadrature avec la tension de mesure s'opère de différentes manières. Les deux moyens les plus communs sont :

- l'addition d'une tension de compensation égale en valeur, mais en opposition de phase,
- la démodulation synchrone pilotée par une tension en phase avec la mesure.

Ces deux principes peuvent être utilisés séparément ou conjointement.

Un dispositif plus ancien, heureusement presque abandonné, se contentait de redresser et de filtrer le signal composé, puis d'opérer un déplacement du zéro.

Il faut retenir qu'un appareil de qualité doit utiliser un démodulateur synchrone. Ce dispositif, en plus de la propriété d'assurer une bonne stabilité malgré des évolutions de la tension parasite, permet des mesures dans les deux sens de l'écoulement en délivrant à la fois la valeur et le signe.

Utilisation

Critères de choix

Un débitmètre électromagnétique n'ajoute aucun obstacle dans une conduite, il n'existe aucun orifice sus-

ceptible de se colmater, aussi cette méthode de mesure occupe une place prépondérante pour les liquides très chargés, voire les magmas semiliquides : eaux usées, pâte à papier, résidus de traitement des eaux et de minerais, boues et rejet des dragues.

Strictement étanche dans son principe, on lui confie aussi les liquides agressifs et dangereux de l'industrie chimique.

L'obstacle principal limitant son utilisation se situe au niveau de la conductibilité électrique du fluide ce qui exclue les huiles et les graisses. Pour les liquides conducteurs contenant des matières isolantes (graisses), certains constructeurs proposent des électrodes munies de dispositifs mécaniques de nettoyage constamment en mouvement.

La conductivité des eaux entièrement déminéralisées comme celles provenant de la condensation de la vapeur est trop faible, toutefois une faible quantité de sels dissous (conductivité supérieure à 1 microhm) suffit si l'on prend la précaution d'utiliser un préamplificateur à haute impédance d'entrée situé au voisinage immédiat du capteur.

Il existe des débitmètres pour des conduites de 2 mètres de diamètre. Ils sont onéreux et leur étalonnage indirect (par le champ magnétique) ou direct est délicat. Lorsqu'une installation de grand débit possède une singularité (convergent) provoquant une perte de charge l'installation d'une petite conduite en dérivation conduit au montage d'un débitmètre de faible section et il y a lieu de procéder à l'étalonnage de l'ensemble. Toutefois, il faut retenir que quoique les appareils actuellement commercialisés soient très fiables, il s'avère toujours souhaitable d'effectuer des étalonnages périodiques.

Le principe électromagnétique possède deux propriétés précieuses pour la résolution de problèmes particuliers :

- le temps de réponse est uniquement limité par la fréquence du courant d'excitation et les caractéristiques de l'électronique associée,
- la mesure s'effectue dans les deux sens de l'écoulement avec indication du signe.

Les fluctuations de vitesse deviennent mesurables ainsi que les oscillations longitudinales : mouvement dans une conduite comportant une cheminée d'équilibre, pompage dans les fluides liés à un asservissement. Les constructeurs n'ayant pas découvert un marché suffisant ne disposent pas de matériel immédiatement adapté.

Les modifications nécessaires risquent de se présenter différemment suivant l'origine du matériel.

La précision et la fidélité sont liées à la stabilité du courant d'excitation du champ magnétique et du gain des amplificateurs. Les récents progrès de l'électronique apportent une grande amélioration par rapport au passé, cependant il est bon de ne pas espérer une précision globale supérieure à 1%. La salissure des électrodes et l'excès de résistivité du fluide perturbent la mesure à partir d'un certain seuil au-dessous duquel leurs variations ne montrent aucune influence.

Les mesures dans les fluides à une température élevée ne sont pas recommandées du fait des problèmes posés par la tenue des isolants électriques à l'intérieur du tube et pour l'enroulement d'excitation. Les pressions élevées ajoutent dans ces conditions une difficulté supplémentaire. Un revêtement

intérieur en email ou en teflon conduit à une limite de l'ordre de 200° pour une pression de 1 bar.

Problèmes d'installation

La sensibilité aux perturbations des profils des vitesses ne justifie pas des précautions particulières, on évitera cependant la proximité immédiate de coude ou de vannes. La meilleure orientation correspond au montage sur une conduite verticale du fait de la diminution du risque de salissure des électrodes; pour une position horizontale ou inclinée, on veillera à placer les deux électrodes dans le même plan horizontal.

Il faut prêter une attention particulière à la longueur du câblage et à son cheminement entre le capteur et l'électronique associée. Le câble de mesure généralement différent du câble d'alimentation doit toujours comporter une gaine de blindage, on évitera le passage dans des régions où règnerait un champ magnétique important. La distance maximale, le capteur étant dépourvu de préamplificateur, est de l'ordre de 50 m; dans le cas contraire, elle n'est pas limitée. On veillera à ce que le câblage ne serve pas à l'écoulement des courants vagabonds entre les deux points. Pour les très longues distances il est souhaitable de ne relier à la terre qu'un seul de ces deux appareils et d'établir entre eux une ligne équipotentielle. Lorsque le fluide risque de se trouver parcouru par des courants électriques de fuites, on utilisera le montage précédemment indiqué et représenté en figure 7.

Détermination des caractéristiques

Les besoins des utilisateurs industriels recouvrent une gamme variée, aussi des constructeurs partent généralement d'éléments standards pour construire l'appareil correspondant aux caractéristiques de chaque demande.

La première démarche consiste à définir le diamètre intérieur. Il est le plus souvent celui de l'installation à condition de tomber dans le domaine des vitesses recommandées, c'est-à-dire de 1 à 10 m/s. Des valeurs plus basses (limite 0,4 m/s) influencent la précision et la stabilité du zéro, plus grandes elles compromettent la longévité de l'isolement interne du tube. Les limites de garanties varient suivant les fournisseurs. Les brides de raccordement se définissent suivant le standard de l'installation.

La nature du fluide : agressivité chimique et mécanique et sa température conduit au choix des électrodes et du revêtement isolant de l'intérieur du tube de mesure. La possibilité d'encrassement des électrodes est combattue grâce à des dispositifs autonettoyants mécaniques ou faisant intervenir des ultrasons. Il existe des électrodes démontables. Les eaux naturelles peu polluées n'exigent pas de précautions particulières.

L'appareillage électronique est identique pour tous les débitmètres du même constructeur qui propose souvent deux ou trois présentations. Il est exclu d'utiliser le capteur d'un fournisseur avec un détecteur d'autre provenance. Les options portent sur les paramètres de sortie. On dispose d'un galvanomètre sur le boîtier du détecteur pour la lecture des débits. Un courant continu au standard demandé (0/20, 4/20 mA. . .) permet la liaison à des régulateurs, des lectures à distance et l'enregistrement. Dans

certains cas, on peut disposer de tensions ou de fréquences représentatives et aussi de seuils d'alarme bas et haut. Des compteurs totalisateurs de 6 à 8 chiffres sont fournis sur demande.

Fournisseurs

Nous donnons ci-dessous une liste non exhaustive de constructeurs en signalant leurs principales caractéristiques.

- BEN Département Mesure de débits – 5, Boulevard du Moulin Guien, 1313 Marseille, Tél. 91.66.44.20.

Cette maison bénéficie dans ce domaine d'une expérience d'une quinzaine d'années. Elle s'est particulièrement intéressée aux problèmes touchant la marine, elle réalise des capteurs particuliers, l'un d'eux convient particulièrement aux mesure de vitesse au niveau d'une paroi, l'autre à la définition des profils de vitesse dans une conduite de grandes dimensions (sabre).

- BROOKS Emerson Electric (France) Division Brooks – 3 rue des Pyrénées, 94573 Rungis : Tél. 686.72.02

Il s'agit d'une entreprise multinationale d'origine américaine ayant des usines en Hollande. Elle présente une gamme complète de débitmètres industriels de 13 mm à 1200 mm avec un grand choix de qualité d'électrodes et de revêtement intérieur dont le téflon permettant des mesures jusqu'à 150°C. Elle semble particulièrement adaptée aux normes américaines.

- KROHNE - rue Premier 26100 Romans sur Isère – Agence de Paris, 11, Faubourg Poissonnière, 75009 Paris. Tél. 246.72.72.

Cette société d'origine allemande possède une usine principale à Duisburg (RFA) une usine en France à Romans (Drôme) et une en Hollande.

Elle est solidement implantée en Europe et détient une importante clientèle dans l'industrie chimique et le traitement des eaux. Elle présente une gamme complète de débitmètres industriels de 10 mm à 2000 mm avec un choix complet de nature d'électrodes et de revêtements intérieurs dont l'émail permet une température de fluide de 200° C.

- SCHLUMBERGER Division contrôle Industriel – 100, rue de Paris, 91.302 Massy, Tél. 930.22.02.

Cette entreprise, après avoir absorbé un certain nombre de sociétés, a repris l'expérience de l'une d'entre elles et crée un matériel nouveau. La réalisation originale se distingue par un courant d'excitation à 30 Hz et des électrodes de forme particulière destinée à s'affranchir du profil des vitesses, leur grande surface autorise des conductibilités très faibles.

Le préamplificateur est systématiquement inclus dans le capteur. L'ensemble de la technologie marque un notable progrès dans le domaine des mesures électromagnétiques cependant l'expérience industrielle est assez récente. Ce constructeur fabrique des débitmètres industriels de 15 mm à 1200 mm avec un choix complet de nature d'électrodes et de revêtement intérieur. Le problème des températures élevées ne semble pas avoir été étudié, par contre, il propose des modèles haute pression pouvant atteindre 350 bar.

Normalisation

Une norme ISO concernant les mesures de débits par la méthode électromagnétique est en cours d'élaboration. Les conséquences sur les résultats provoqués par des singularités dans les conduites en amont et en aval de l'appareillage sont en cours d'étude. Il est intéressant de relever dans le projet un certain nombre de données.

Les tolérances de stabilité et d'influence des paramètres extérieurs doivent correspondre aux limites suivantes :

- Linéarité : $\pm 0,5 \%$ de la valeur moyenne
- Erreur de zéro : $0,5 \%$ de la pleine échelle
- Stabilité du zéro : $0,5 \%$ de la pleine échelle par mois
- Précision de l'étalonnage :
 - écoulement réel dans la gamme de fonctionnement : $\pm 1 \%$ de la pleine échelle,
 - écoulement réel avec extrapolation : erreur supplémentaire de $0,5 \%$ du facteur d'extrapolation, total maximal 5% .
- par le champ magnétique : 2%
- Influence de la tension d'alimentation : $\pm 1 \%$ pour une variation de $\pm 10 \%$
- Influence de la fréquence du courant d'alimentation : $\pm 1 \%$ pour une variation de $\pm 2 \%$
- Influence de la pression interne : $\pm 0,25 \%$ pour la pleine gamme de pression
- Influence de la température du liquide : $0,01 \%$ par °C
- Influence de la température au voisinage du capteur : $0,01 \%$ par °C
- Influence de la température au voisinage de l'électronique : $0,05 \%$ par °C
- Stabilité générale de l'étalonnage, dérive maximale : 1% après un an

La normalisation reconnaît les matériaux suivants : ébonite, caoutchouc naturel, néoprène, polyuréthane, P.T.F.E. (teflon), polyamides, polyesters chlorés pour le revêtement intérieur des tubes de mesure et : acier inoxydable, Hastelloy'B, Hastelloy C, monel K, platine, iridium, tantale, titane pour la nature des électrodes. Elle précise une terminologie et donne des recommandations sur les dimensions maximales de l'élément primaire.

Avenir de la méthode

Les débitmètres électromagnétiques bénéficient d'une bonne maîtrise industrielle qui ne cessera de s'améliorer au fur et à mesure de l'expansion du marché. Des utilisateurs potentiels conservent encore une certaine défiance quelquefois justifiée par une expérience malheureuse au moment (1955 – 1960) où des constructeurs avaient sous-estimé les difficultés. Les prix encore élevés de l'ordre de 10 000 à 50 000 francs suivant les dimensions pour l'ensemble du tube de mesure et de l'électronique, baisseront vraisemblablement avec l'augmentation du nombre d'appareils vendus.

A titre d'exemple, on envisagera le cas de la mesure des débits d'eau de circulation des centrales thermiques et

nucléaires, et des débits turbinés dans les centrales hydrauliques.

Les débitmètres les plus importants apparaissent déjà insuffisants, ils représentent une solution onéreuse et peu adaptée, mais deux autres voies sont ouvertes. L'une utiliserait une perte de charge de la conduite pour installer en dérivation un débitmètre de petite section, l'autre déplacerait un ou plusieurs capteurs de vitesse à l'intérieur de la conduite. Dans ces deux cas, il faudrait prévoir un étalonnage de l'ensemble par un moyen traditionnel, comme des moulinets ou encore à l'aide de traceurs radioactifs.

Le premier procédé, immédiatement réalisable, trouve ses limites suivant la géométrie des installations. On peut escompter une bonne linéarité de la mesure ou éventuel-

lement ajouter un dispositif de linéarisation dans l'électronique.

La seconde disposition, beaucoup plus universelle, nécessite un capteur spécial. La tuyère électromagnétique (figure 6) apparaît comme le plus adapté, mais il n'existe pas sur le marché de modèle monolithique et étanche. Electricité de France a réalisé en 1962 plusieurs prototypes d'un diamètre hors tout de 90 mm qui ont donné entière satisfaction jusqu'à ce que les matières plastiques se fissurent par vieillissement.

Dans l'immédiat le capteur "Sabre" de la maison BEN pourrait être utilisé (figure 8) avec un minimum d'adaptation. Il se trouve moins bien protégé contre les tensions parasites extérieures que la tuyère, ce qui présente un inconvénient négligeable pour les conduites métalliques, par contre, il perturbe très peu l'écoulement du fluide et devient préférable dans certains cas.

Les mesures dans les métaux liquides soulèvent des difficultés technologiques liées à la température, mais elles sont susceptibles de simplification : l'utilisation d'un champ magnétique continu peut être envisagée, compte tenu de l'excellente conductibilité du fluide et de l'absence de tensions parasites d'ionisation.

Conclusion

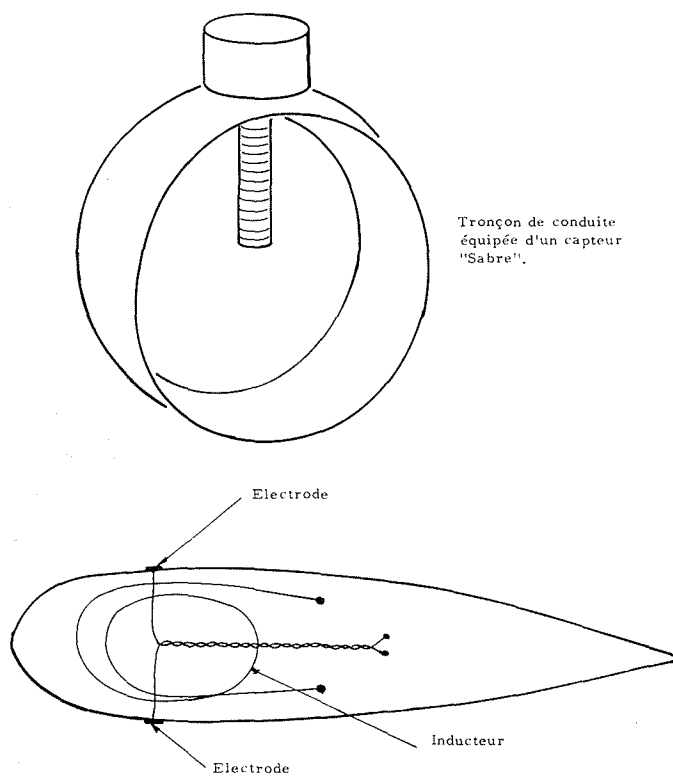
La mesure des vitesses et des débits par la méthode électromagnétique a maintenant dépassé le stade des maladies de jeunesse. Elle bénéficie des récents progrès des composants électroniques et conquiert un secteur uniquement limité par la conductibilité des fluides.

Un effort de standardisation actuellement en cours, appuyé par une normalisation, conduira à une ouverture certaine de cette méthode pour la plupart des mesures dans les eaux naturelles et des eaux fortement chargées.

On peut espérer l'utiliser dans un avenir assez proche, avec des étalonnages appropriés, pour les grands débits en conduite fermée.

L'étude d'appareillage fonctionnant en haute température et forte pression est liée aux débouchés d'utilisation limités par la conductibilité des fluides.

Il faut enfin signaler tout particulièrement l'intérêt encore inexploité de la méthode pour la mesure des vitesses et des débits fluctuants ou variables.



Les lignes de force du champ magnétique sont sensiblement parallèles à la génératrice du tube profilé.

8/ Capteur "sabre" de BEN, coupe