

L'intelligence mène la course

Le diagnostic des appareils de terrain, gage de fiabilité

Andrea Andenna, Daniel Schrag, Armin Gasch, Paul Szász



Attentifs aux progrès techniques de la dernière décennie, les clients de l'instrumentation de process sont de plus en plus exigeants. Les technologies de traitement numérique du signal et de communication haut débit, entre autres, ont tellement dopé les échanges entre l'atelier et le système de contrôle-commande distribué que les appareils de terrain doivent aujourd'hui fournir des diagnostics poussés, assortis de mesures ultra-précises.

Ces dernières années, les chercheurs d'ABB ont travaillé d'arrache-pied pour être à la hauteur de ces exigences avec des instruments de terrain multifonctions offrant une pléiade d'innovations. Des fonctions de diagnostic supplémentaires, comme la redondance automatique de la sonde ou la surveillance de la dérive capteur, par exemple, sont les facteurs de différenciation du nouveau transmetteur de température pour montage en tête TTH300 d'ABB. Des fonctionnalités comme la détection de bulles de gaz, le diagnostic du colmatage des électrodes et la mesure de conductivité équiperont la prochaine génération de débitmètres électromagnétiques (DEM); dans la foulée, les futures versions à effet Vortex et à tourbillons s'enrichiront d'un algorithme de suppression automatique des vibrations.

L'époque où le capteur se contentait de mesurer est bel et bien révolue. Les contraintes de coût et l'impérieuse nécessité d'améliorer les performances de la production en réduisant ses temps d'indisponibilité poussent les industriels à réclamer des instruments de process doués pour le diagnostic, le calcul, la communication... bref, « intelligents ». A l'évidence, nombre de ces clients veulent substituer à l'inertie de la maintenance préventive une maintenance *prédictive* et une gestion des actifs industriels à la fois plus efficaces et mieux ciblées [1] **Encadré**.

Bien conscients de cette tendance, ABB et ses concurrents font plus ou moins de l'« autodiagnostic » le mot d'ordre des nouvelles générations d'instruments.

Cette évolution du cahier des charges des capteurs de process trouve écho dans les récentes recommandations NAMUR et VDI/VDE [2], qui mettent en exergue l'intérêt de l'utilisateur final pour une métrologie toujours plus robuste et précise. D'où la pluralité des missions confiées aux capteurs, de la simple mesure des paramètres *process* à des données intermédiaires et tendancielle sur les propriétés du produit aux fins de contrôle (quantité produite, variation de la production, sous-produits, proportion de corps solides polluants dans les gaz, qualité...).

La numérisation du signal et les communications haut débit permettent aux appareils de fournir des diagnostics poussés et des mesures ultraprécises.

Electronique intelligente pour appareils multifonctions

Dans le passé, le signal électrique d'un capteur primaire servait à alimenter un dispositif de lecture. Or l'explosion de l'électronique numérique au cours des dernières années permet d'extraire des informations utiles et importantes, directement

du signal brut d'un capteur. L'essor des microprocesseurs et des convertisseurs en technologie DSP (*Digital Signal Processor*) améliore la qualité et la précision de la mesure ainsi que la linéarité du signal en sortie du transducteur, tout en réduisant les bruits parasites. A cela s'ajoutent des fonctions de diagnostic comme

Encadré Des capteurs sous pression

Les capteurs industriels (débit, pression...) opèrent souvent dans des conditions climatiques et de production extrêmes. L'agressivité du milieu est source de corrosion, d'abrasion, d'obstruction des équipements et des conduites **photo**. Et lorsqu'un appareil ne fonctionne plus correctement, il faut réparer.

Les équipements « à autodiagnostic », capables de reconnaître et de remonter les défaillances ou dégradations du procédé, sont les ingrédients essentiels d'une stratégie de maintenance efficace. Il n'est pas rare que les nouvelles générations d'instruments sachent déceler non seulement leurs propres défauts internes (dérive, vieillissement...) mais aussi les variations du procédé (écoulements pulsatoires, bulles...) tout en suivant l'état fonctionnel des autres composants qui leur sont raccordés. La détection, voire la compensation, de la plupart de ces effets fait appel à des algorithmes dédiés de traitement du signal.



l'autocontrôle de l'appareil (détection des défauts électroniques, par exemple), la surveillance des données *process* (vérification de l'ouverture des prises d'impulsion d'un transmetteur de pression...) et autres fonctionnalités de pointe. C'est aussi là qu'interviennent les techniques de sécurité.

Jusqu'à une date récente, l'innovation fonctionnelle était le pré carré du niveau contrôle-commande, bien mieux loti en puissance de calcul. Aujourd'hui, les progrès de l'électronique et du logiciel embarqué permettent de descendre dans l'atelier. Précisons que certaines fonctions évoluées ne peuvent être implantées que dans un appareil de terrain car elles requièrent des vitesses d'échantillonnage supérieures aux débits habituellement autorisés par les bus d'automatismes.

ABB n'a eu de cesse de créer des instruments de process multifonctions, conformes aux exigences accrues des clients.

Il existe deux façons de mettre en œuvre ces fonctions avancées dans un appareil :

■ **Privilégier l'approche « traitement du signal » pure** : les capteurs deviennent essentiellement *logiques* puisque ces ajouts fonctionnels sont implantés à l'aide de programmes mathématiques et d'algorithmes embarqués dans le processeur du transmetteur, sans toucher à l'élément sensible ni à la mécanique du capteur.

■ **Greffer un capteur du commerce au transducteur** : par exemple, le transmetteur 267/269 d'ABB mesure simultanément, grâce à sa technologie multicapteur, des variables multiples du procédé (pression différentielle, pression absolue et température) pour calculer le débit massique.

En général, la numérisation du traitement permet d'extraire l'information utile du signal brut, suivant deux méthodes : l'analyse mathé-

1 Capteurs de température et transmetteur TTH300 d'ABB



Solutions de productivité

matique directe des données et la modélisation physique, plus complexe. Dans le premier cas, le chronogramme du signal brut peut être étudié par une analyse de corrélation, du spectre ou du bruit afin de trouver les fonctions caractéristiques et les indications de dysfonctionnement. Autre facteur élargissant l'horizon des applications et fonctionnalités envisageables : l'émergence de nouveaux algorithmes et techniques de traitement du signal plus puissants, tels que l'analyse statistique du signal, l'analyse non linéaire des données, le filtrage adaptatif, les réseaux neuronaux et les ondelettes. Cette dernière méthode consiste à élaborer un modèle physique du système de détection par des équations décrivant les principes scientifiques sur lesquels repose le capteur ou par simulations. Le choix et le bien-fondé de l'une ou l'autre méthode (analyse avancée ou modélisation physique) tiennent beaucoup à l'application, à l'intégrité des données de mesure et à la puissance de calcul exploitable [3].

Les équipements à autodiagnostic, capables de reconnaître et de remonter les défaillances ou dégradations du procédé, jouent un rôle capital dans l'efficacité de la maintenance.

Plus intelligent mais plus contraignant ?

En instrumentation industrielle, il est un critère fondamental pour conserver ou accroître sa part de marché : le prix. L'importance de la richesse fonctionnelle est affaire de point de vue. Les exploitants de grosses unités de production continue dotées d'un vaste parc de capteurs/actionneurs onéreux, dont les vannes, sont enclins à payer plus pour des fonctionnalités de pointe. Les

fonctions de diagnostic des équipements et du procédé ont particulièrement la cote car elles promettent de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer, en règle générale, la fiabilité opérationnelle du site. A l'inverse, les clients se contentant de fonctions élémentaires rechigneront à délier

leurs bourses. Il faut donc, en phase de développement fonctionnel, faire la part des choses entre coût et faisabilité technique.

La recherche ABB a toujours investi dans les diagnostics avancés et le traitement numérique du signal ; en attendent les paragraphes suivants.

Une mesure de température fiable

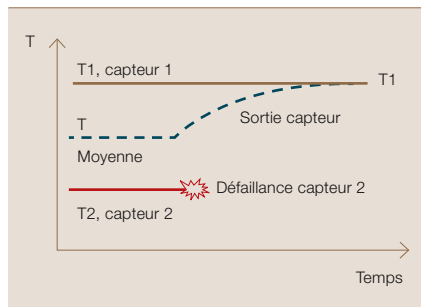
La thermométrie par sondes à résistance ou thermocouples offre une très grande précision fondée sur des principes de mesure directs, remarquables de simplicité. Faut-il en déduire que le traitement du signal n'apporte guère d'améliorations aux capteurs de température ? Ce serait oublier que la dérive ou même la casse des bonnes vieilles sondes thermiques usées par les conditions industrielles font le quotidien de l'instrumentiste ! Si la

défaillance est aisément détectée, une dérive de l'appareil peut dégrader le procédé ou engendrer une perte de qualité insoupçonnée. Dans bien des cas, la maintenance préventive traditionnelle impose une coûteuse campagne de réétalonnage annuel des sondes de température.

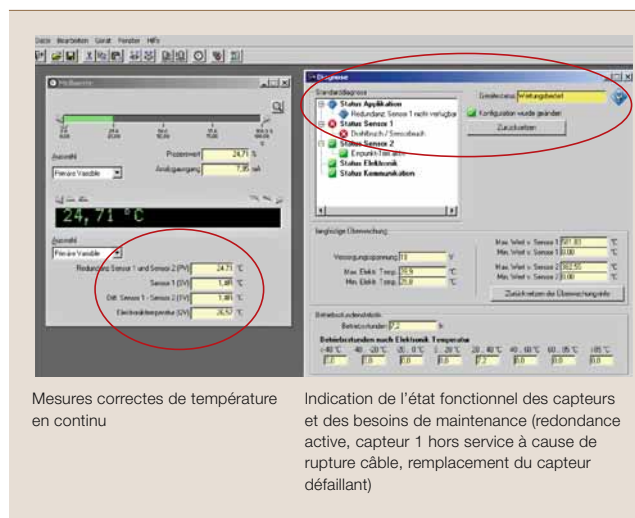
La demande de maintenance prédictive grandissant, les clients sont à l'affût de nouvelles solutions. La productivité des procédés dans lesquels la régulation thermique est primordiale augmente notablement quand la mesure est fiable. D'où le développement de fonctions de diagnostic de haute technicité pour les transmetteurs de température.

Le transmetteur Hart TTH300 d'ABB, commercialisé depuis avril 2006, affiche un large éventail de fonctions d'autodiagnostic dans un boîtier compact de 44 mm de diamètre pour offrir une grande précision (jusqu'à 0,1 °C) doublée d'une fiabilité et d'une disponibilité élevées [1]. Pour en tirer pleinement parti, l'appareil intègre deux nouvelles fonctions de diagnos-

- 2 Sortie capteur avec la fonction de redondance capteur active : la défaillance d'un capteur donne lieu à une transition progressive vers le signal du capteur de secours.



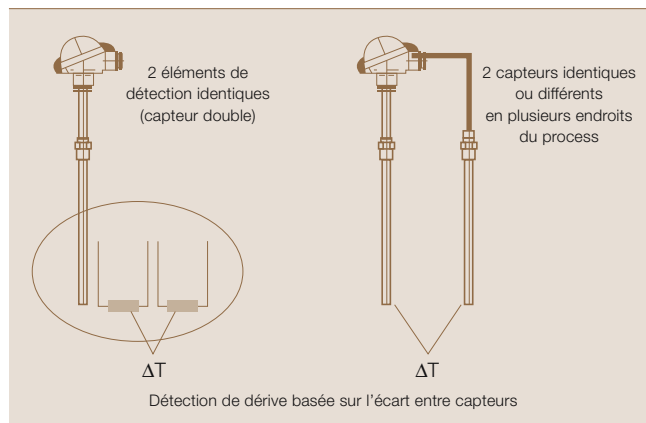
- 3 Ecran DTM de la fonction de redondance capteur active



Mesures correctes de température en continu

Indication de l'état fonctionnel des capteurs et des besoins de maintenance (redondance active, capteur 1 hors service à cause de rupture câble, remplacement du capteur défaillant)

- 4 Configurations de capteurs adaptées à la détection de dérive



tic : la «redondance capteur» et la détection de dérive. Doté d'une plus grande puissance de calcul, il peut réaliser des algorithmes en local, sans surcharger le réseau de communication.

Les transmetteurs de température Hart TTH300 d'ABB ajoutent à leur fiabilité et à leur précision une panoplie de fonctions d'autodiagnostic dans un boîtier compact de 44 mm de diamètre.

Par leur aptitude à gérer deux sondes platine ou thermocouples (ou ces deux techniques en parallèle), le TTH300 et sa redondance capteur font beaucoup progresser la disponibilité de la mesure. Auparavant, la défaillance d'un capteur de température obligeait à raccorder manuellement un nouveau capteur au transmetteur, entraînant de longs et coûteux arrêts de production. Aujourd'hui, dès qu'une défaillance est décelée par les diagnostics intégrés, le transmetteur bascule automatiquement sur le second capteur pour garantir la continuité de la mesure ² et en informe le gestionnaire des fichiers numériques descriptifs de l'appareil (*Device Type Manager*) ³. Le remplacement du capteur peut être programmé à moindres frais lors du prochain contrôle périodique, sans occasionner d'arrêt de production supplémentaire.

La dérive menace à la longue tous les capteurs soumis à des sollicitations mécaniques (milieu vibratoire) ou thermiques (échauffement). Même si cette lente évolution n'entraîne aucune altération extérieure visible, elle peut être fatale au procédé comme à la qualité du produit. Jusqu'à présent, on y remédiait par un étalonnage régulier mais coûteux du capteur, en termes d'indisponibilité : une intervention périodique qui peut s'avérer très souvent inutile lorsque les capteurs conservent leur stabilité en l'absence de contraintes environnementales sévères.

Depuis début 2007, le nouveau TTH300 apporte une réponse à ce

problème avec une maintenance prédictive consistant à surveiller la dérive capteur et à réétalonner au moment opportun. Concrètement, le TTH300 contrôle en permanence ses deux capteurs et compare leurs données ; s'ils fonctionnent dans la tolérance prescrite (donc, sans dérive), l'écart de mesure est infime. Par contre, quand l'un d'eux dérive, l'écart dépasse le seuil paramétré et déclenche l'envoi par le transmetteur d'une demande de réétalonnage ou de remplacement au prochain contrôle périodique. Ces actions étant subordonnées à l'apparition d'une dérive, la fréquence et le coût de la maintenance des capteurs baissent d'autant.

C'est sur un capteur double que la détection de dérive donne toute sa mesure ⁴ : bien que la dérive soit un phénomène imprévisible et aléatoire, des recherches en laboratoire ont confirmé que deux capteurs ne dériveraient pas de façon identique, même s'ils enduraient des conditions de vieillissement analogues. Autre possibilité : appliquer cette fonction à des capteurs implantés en différents endroits du procédé pour, par exemple, détecter les variations globales du profil d'écoulement. Cette configuration permet à son tour de détecter des problèmes ponctuels, tels que de mauvais échanges thermiques dus à l'accumulation de dépôts dans les conduites et équipements.

Le débitmètre électromagnétique, fiable et banalisé, a conquis bien des domaines : eau potable, eaux usées, agroalimentaire, papier et chimie.

L'utilisateur peut définir un seuil en fonction de la sensibilité du procédé à la dérive. La précision de réglage entre les deux capteurs détermine alors le seuil minimum d'alarme applicable. Avec une compensation d'erreur de mesure à un ou deux points, le seuil de détection avoisine 0,5 à 1°C car les caractéristiques d'un des deux capteurs diffèrent toujours de cette valeur. On peut encore abaisser ce seuil avec des informations de

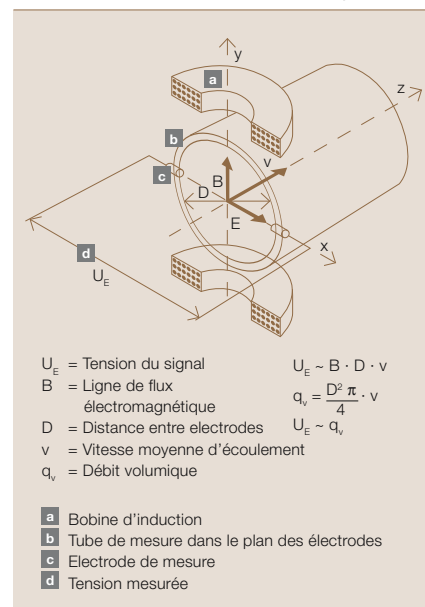
mesure plus précises ; il n'en demeure pas moins qu'il satisfait aux besoins de plus de 90 % des applications.

La détection du colmatage sur un débitmètre électromagnétique est une démarche pluridisciplinaire reposant sur une compréhension approfondie du procédé.

C'est magique !

Le marché mondial de la débitmétrie électromagnétique se chiffre à près de 700 millions de dollars. Inventé en 1941 par Bonaventura Thürlmann, ce principe de mesure fiable et banalisé a conquis un grand nombre de domaines : production d'eau potable, traite-

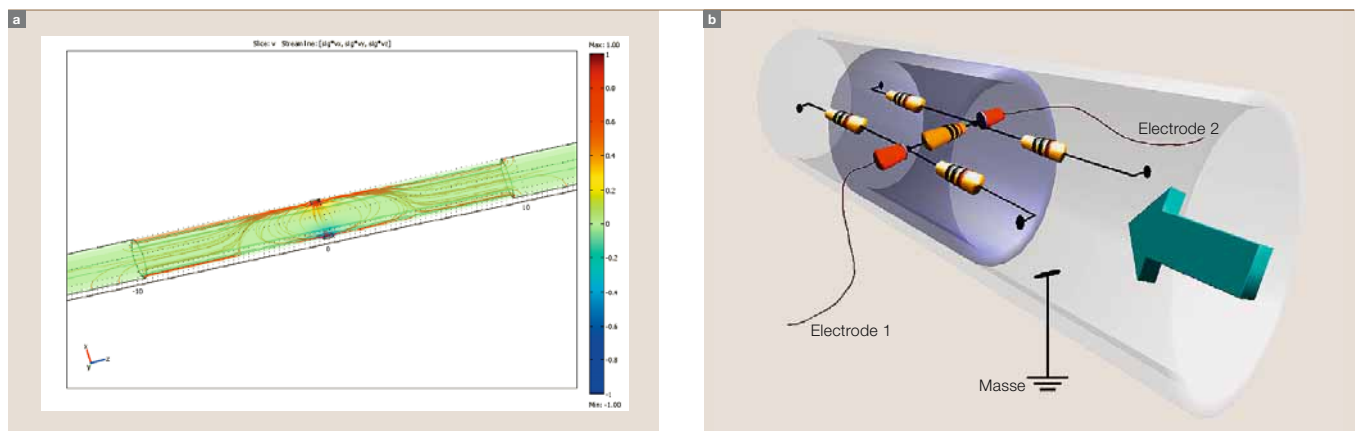
5 Principe du débitmètre électromagnétique



6 Encrassement d'un débitmètre électromagnétique dans l'industrie papetière



7 Simulation de champs et modèle de débitmètre à résistances électriques



ment d'eaux usées, industries agroalimentaire, papetière et chimique.

Son fonctionnement repose sur les lois établies par Faraday : un champ magnétique B , perpendiculaire au sens d'écoulement du fluide, est engendré par deux bobines disposées de part et d'autre du tube [5]. Ce champ induit dans le liquide conducteur une tension U_E captée par deux électrodes de mesure, directement proportionnelle au débit volumique q_v . Viscosité, densité, température et pression n'ont aucun effet sur la lecture de la vitesse moyenne d'écoulement v .

Le projet MAGIC s'est attaché à réaliser un DEM à mesure multivariable qui surveille non seulement le capteur mais diagnostique aussi les conditions du process : détection de bulles de gaz dans le milieu, encrassement du système, mesure de conductivité du liquide...

Le fait est que l'accumulation et l'adhérence de fluides ou de solides dans le système ne dégradent pas seulement les pompes et les canalisations mais aussi le DEM [6]. Qu'il soit isolant ou conducteur, le colmatage altère les électrodes : le premier type en rogne constamment la surface au point de mettre le DEM en panne, tandis que le second l'augmente progressivement jusqu'à provoquer un court-circuit. Il est donc capital de surveiller ce phénomène pour l'enrayer en amont.

Depuis une trentaine d'années, les Vortex sont la « génération montante » de la débitmétrie industrielle.

Un algorithme bien pensé

Le développement de diagnostics de colmatage pour débitmètre électromagnétique est une démarche pluridisciplinaire reposant sur une compréhension très fine du procédé. Le premier point d'ancrage fut les aspects théoriques des interfaces électrode-électrolytes. Des mesures effectuées en laboratoire dans diverses conditions, suivies de mesures *in situ* chez les clients d'ABB représentatifs de différentes applications permirent d'analyser les encrassements spécifiques du procédé.

Les effets des différentes propriétés de liquides et des matériaux de colmatage ont été analysés par des mesures et simulations ; celles-ci servirent ensuite à élaborer des modèles physiques d'équipements, qu'il restait à extrapo-

ler pour faciliter la conception de débitmètres de plus gros diamètres.

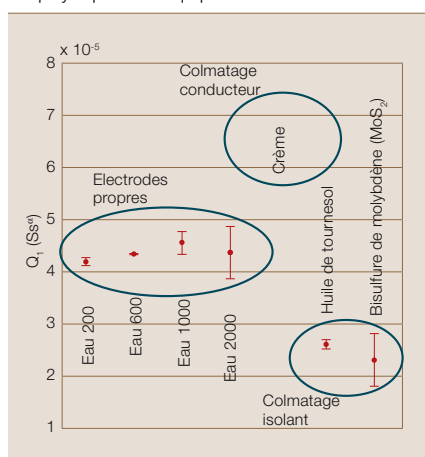
L'effet du colmatage sur un DEM est modélisé à l'aide de résistances liées à la fréquence, que l'on interpose entre les électrodes et la masse de l'appareil [7b]. Des éléments à phase constante reproduisent précisément les caractéristiques de l'interface électrode-électrolyte pour fournir des informations clés sur le colmatage réel (électrodes propres, encrassement conducteur ou isolant) du DEM et, par voie de conséquence, sur le système. L'inverse de l'impédance entre électrodes, à hautes fréquences, est nettement proportionnel à la conductivité du liquide dans le débitmètre.

L'offre de débitmètres ABB s'est enrichie de fonctions de mesure de conductivité et de détection des bulles de gaz.

Ces mesures expérimentales furent réalisées avec différents liquides colmatants. La conductivité de l'eau, comprise entre 200 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, n'influe guère sur l'interface électrode-électrolyte [8] ; à l'inverse, un colmatage conducteur (crème) ou isolant (huile ou lubrifiant au bisulfure de molybdène) modifie l'élément à phase constante, ce qui permet de mesurer le colmatage indépendamment de la conductivité du milieu.

Outre ces diagnostics, ABB a enrichi son offre de débitmétrie industrielle, en partenariat avec ses clients alle-

8 Détection du colmatage par modélisation physique de l'équipement



mands et suédois, d'une mesure de conductivité et d'une détection des bulles de gaz.

Pour renforcer leur immunité aux parasites, les Vortex d'ABB intègrent un second capteur piézoélectrique.

Immunité aux vibrations

Depuis une trentaine d'années, les débitmètres à Vortex sont les vedettes de la débitmétrie industrielle et poursuivent encore aujourd'hui leur ascension en s'affranchissant des vibrations parasites.

Leur principe ⁹ se base sur le phénomène de génération de tourbillons : le passage d'un fluide sur un corps perturbateur (*barreau*) crée, de part et d'autre de l'obstacle, des tour-

billons (*vortex*) dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du fluide. En aval, ce chemin tourbillonnaire est détecté par un capteur piézoélectrique, sensible aux variations oscillatoires de pression.

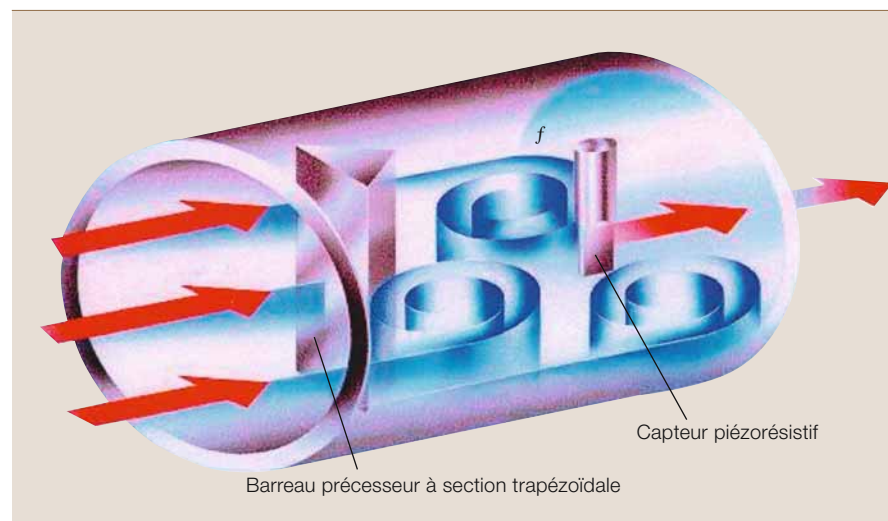
Le Vortex se basant sur une mesure de fréquence, les perturbations de type pulsations d'écoulement et vibrations de conduite (machines tournantes à proximité du débitmètre) peuvent compromettre sa performance. Pour y remédier, ABB a revu les algorithmes de calcul et le traitement du signal de ses débitmètres Vortex et à tourbillons.

En temps normal et sans bruit significatif, le spectre fréquentiel en sortie de capteur piézoélectrique présente un seul pic correspondant à la fréquence des tourbillons. En régime vibratoire, le spectre du signal piézoélectrique peut afficher des pics supplémentaires de forte amplitude ¹⁰ :

à gauche, le tracé du signal piézoélectrique montre un pic de 11 Hz dû au régime d'écoulement normal, suivi d'une perturbation grimpant à 30 Hz (presque 3 fois plus!), provoquée par les vibrations. Ces effets sont surtout manifestes aux petits débits lorsque l'amplitude des oscillations engendrées par les tourbillons est faible. Or ce problème ne peut être résolu par un simple filtrage du bruit « aveugle ».

Pour renforcer l'immunité aux parasites de ses débitmètres Vortex, ABB les a dotés d'un second capteur piézoélectrique monté à l'extérieur du tube, qui réagit seulement aux perturbations. L'algorithme de compensation mis en œuvre est capable d'éliminer les pics de vibration sans supprimer le pic d'écoulement lorsque les vibrations sont à la même fréquence. Sans cette stratégie, l'algorithme délivrerait la sortie faussée de 30 Hz ¹⁰. Le tracé de droite illustre le signal après compensation : le pic vibratoire a totalement disparu, le pic principal est intact.

⁹ Principe de la mesure à effet Vortex



Andrea Andenna

Daniel Schrag

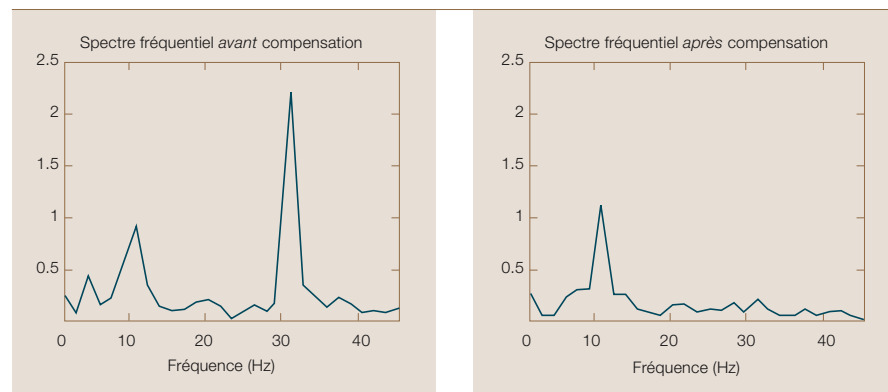
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
andrea.andenna@ch.abb.com
daniel.schrag@ch.abb.com

Armin Gasch

Paul Szász

ABB Corporate Research
Ladenburg (Allemagne)
armin.gasch@de.abb.com
paul.szasz@de.abb.com

¹⁰ Effets de l'algorithme de compensation en vibrations



Bibliographie

- [1] Gebhardt, J., Müller, P. O. *Droit de regard sur le process – Diagnostics à la fois : un usage de raison*, Revue ABB, 1/2006, p. 68–73
- [2] NAMUR, VDI/VDE (GMA), 2006, *Final Report Technology-Roadmap Process-Sensors 2005–2015*
- [3] Riegler, P. 2002, *Pitfalls of Advanced Data Analysis for Soft Sensors*, 11. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Mess-Systeme, Ludwigsburg 63–66

Lecture complémentaire

Keeping, S., Volonterio, E., Keech, R., Johnston, G., Andenna, A. *Traitement de faveur*, Revue ABB, 4/2007, p. 12–17