

## Capteurs inductifs de vitesse de rotation du moteur

### Applications

Les capteurs inductifs de vitesse de rotation (capteurs-tiges), appelés aussi « capteurs tachymétriques », sont utilisés pour :

- mesurer le régime du moteur,
- détecter la position du vilebrequin (position des pistons du moteur).

La vitesse de rotation est calculée à partir de la fréquence des signaux émis par le capteur. Le signal du capteur de vitesse de rotation est l'un des paramètres essentiels du système électronique de gestion du moteur.

### Conception et fonctionnement

Le capteur est placé directement en face d'un disque-cible ferromagnétique (figure 1, rep. 7) dont il est séparé par un entrefer. Il comprend un noyau en fer doux (pièce polaire) (4) qui est entouré par un enroulement (5). La pièce polaire est assemblée à un aimant permanent (1). Un champ magnétique s'étend entre la pièce polaire et le disque-cible. La valeur du champ magnétique, qui traverse la bobine, diffère selon que le capteur se trouve en face d'une dent ou d'un entredent du disque-cible. Une dent concentre le flux de dispersion de l'aimant. Il y a alors amplification du flux utile à travers la bobine. Par contre, un entredent affaiblit le flux magnétique. Ces variations du flux magnétique induisent dans la bobine une tension de sortie sinusoïdale, dont la valeur est

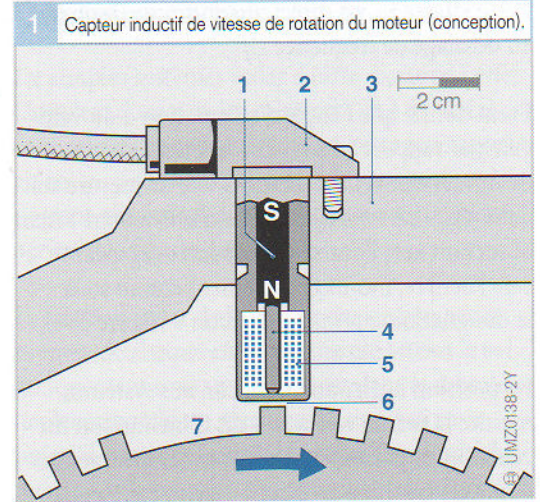


Figure 1

- 1 aimant permanent
- 2 boîtier du capteur
- 3 carter moteur
- 4 tige polaire
- 5 enroulement
- 6 entrefer
- 7 disque-cible avec repère de référence

proportionnelle à la vitesse de variation du flux et donc à la vitesse de rotation (figure 2). L'amplitude de la tension alternative croît fortement lorsque la vitesse de rotation augmente (de quelques mV à plus de 100 V). Une amplitude suffisante est atteinte pour une vitesse de rotation minimale de 30 tours par minute.

Le nombre de dents du disque-cible dépend de l'application prévue. Les disques-cibles, qui sont affectés aux systèmes de gestion moteur à commande par électrovanne, présentent 60 dents sur leur périphérie, dont deux sont supprimées (7). Le disque compte donc  $60 - 2 = 58$  dents. L'entredent particulièrement large (dents manquantes) constitue un repère de référence qui matérialise une position bien définie du vilebrequin. Il sert à la synchronisation du calculateur.

Une autre version de disque-cible dispose, sur sa périphérie, d'une dent par cylindre. Quatre dents sont donc affectées à un moteur de quatre cylindres, c.-à-d. que quatre impulsions sont générées par tour.

La géométrie des dents et celle des pôles doivent être adaptées l'une à l'autre. Le circuit d'exploitation du calculateur transforme la tension sinusoïdale d'amplitude fortement variable en une tension rectangulaire d'amplitude constante. Ce signal est exploité par le microcontrôleur du calculateur.

2 Signal d'un capteur inductif de vitesse de rotation du moteur.

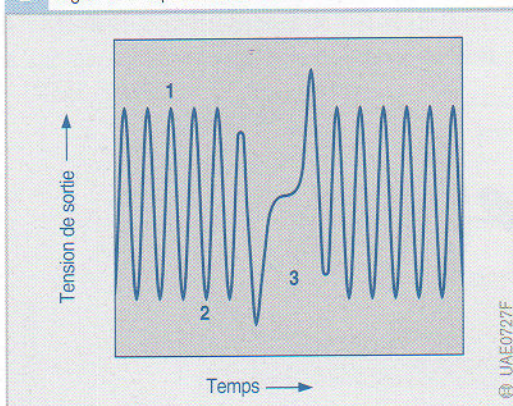


Figure 2

- 1 dent
- 2 entredent
- 3 repère de référence



## Capteurs de vitesse de rotation et capteurs incrémentiels d'angle de rotation

### Applications

Les capteurs de vitesse de rotation et incrémentiels d'angle de rotation équipent les pompes d'injection distributrices à commande par électrovanne. Leurs signaux servent à la

- mesure de la vitesse de rotation actuelle de la pompe distributrice,
- détermination de la position angulaire momentanée de la pompe par rapport à l'arbre à cames du moteur,
- mesure de la position momentanée du variateur d'avance.

La vitesse de rotation actuelle de la pompe représente l'un des paramètres d'entrée du calculateur de la pompe distributrice. A partir de cette grandeur, le calculateur détermine la durée d'activation de l'électrovanne haute pression et, le cas échéant, de l'électrovanne du variateur d'avance.

La durée de pilotage de l'électrovanne haute pression intervient dans le calcul du débit d'injection de consigne en fonction des conditions de fonctionnement du moment. La position angulaire momentanée définit les instants d'activation de l'électrovanne. Seul le pilotage adapté à la position angulaire correcte garantit que la fermeture et l'ouverture de l'électrovanne haute pression ont lieu en accord avec la levée de came adéquate. La précision de pilotage contribue à l'obtention du début et du débit d'injection corrects.

La position angulaire nécessaire à la régulation du variateur d'avance est déterminée par comparaison des signaux du capteur de vitesse du vilebrequin et du capteur d'angle de rotation.

### Conception et fonctionnement

Le capteur de vitesse/d'angle de rotation explore un disque-cible qui comporte 120 dents et qui est monté sur l'arbre d'entraînement de la pompe distributrice. Ce disque-cible présente de larges entredents (répartis régulièrement sur sa périphérie) qui correspondent au nombre de cylindres du moteur.

Le type de capteur utilisé est un capteur magnétorésistif différentiel double.

Les magnétorésistances sont des résistances à semi-conducteurs dont l'effet magnétique est contrôlable. Leur structure est identique à celle des capteurs à effet Hall. Les quatre résistances du capteur magnétorésistif différentiel constituent un circuit électrique intégral en pont.

Le capteur dispose d'un aimant permanent, dont la surface polaire orientée vers le disque-cible est homogénéisée par une fine pastille ferromagnétique. L'organisation des quatre magnétorésistances sur cette pastille correspond à la moitié de l'entraxe des dents. Deux des magnétorésistances se trouvent donc alternativement en face des entredents et les deux autres en face des dents. Les magnétorésistances destinées aux applications automobiles supportent des températures maximales  $\leq 170\text{ }^\circ\text{C}$  (brièvement  $\leq 200\text{ }^\circ\text{C}$ ).

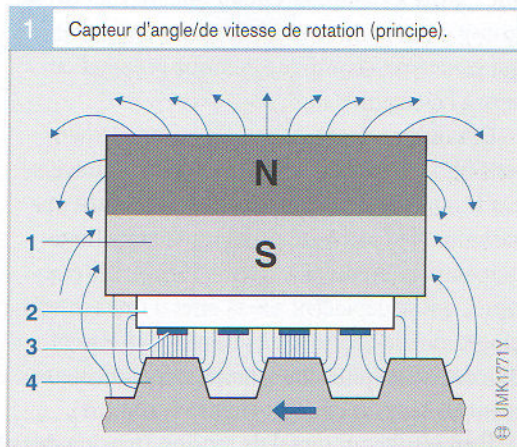


Figure 1

- 1 aimant
- 2 pastille d'homogénéisation (Fe)
- 3 magnétorésistance
- 4 roue-cible dentée

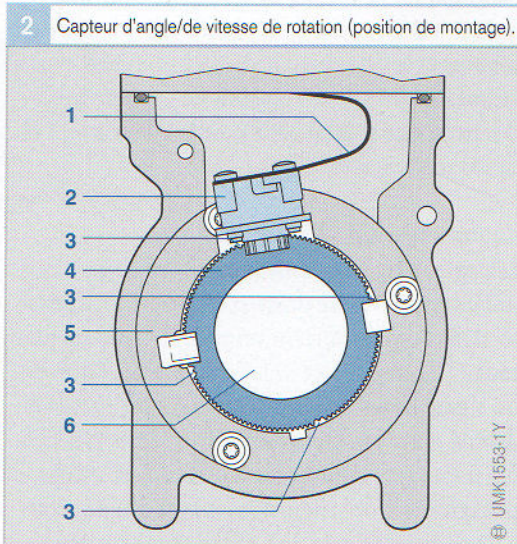


Figure 2

- 1 film conducteur souple
- 2 capteur d'angle/de vitesse de rotation
- 3 entredent
- 4 roue-cible dentée (rotor détecteur)
- 5 bague-palier rotative
- 6 arbre d'entraînement



## Capteurs de phase à effet Hall

### Applications

L'arbre à cames tourne à demi-vitesse du vilebrequin (arbre moteur). Sa position indique si un piston du moteur, qui se déplace vers le point mort haut, se trouve en phase de compression ou en phase d'échappement. Le capteur de phase solidaire de l'arbre à cames transmet cette information au calculateur.

### Conception et fonctionnement

#### Capteur-tige à effet Hall

Ce type de capteur (figure 2a) exploite l'effet Hall : un rotor réalisé en matériau ferromagnétique (rep. 7, disque-cible à dents ou segments ou bien diaphragme perforé) tourne en même temps que l'arbre à cames. Le circuit intégré Hall (6) se trouve entre le rotor et un aimant permanent (5) qui génère un champ magnétique perpendiculaire à l'élément Hall.

Dès qu'une dent (Z) passe devant l'élément sensible (plaquette à semi-conducteurs) traversé par le courant du capteur-tige, il se produit une variation de l'intensité du champ magnétique perpendiculairement à l'élément Hall. Les électrons, qui se déplacent sous l'effet d'une tension longitudinale appliquée à l'élément, subissent une déviation plus importante perpendiculairement au sens du courant (figure 1, angle  $\alpha$ ).

Il en résulte un signal de tension (tension de Hall) qui est de l'ordre de quelques millivolts et qui est indépendant de la vitesse relative entre le capteur et le disque-cible. L'électronique d'exploitation intégrée au circuit Hall du capteur conditionne le signal de tension et le transforme en un signal rectangulaire (figure 2b).

#### Capteur-tige différentiel à effet Hall

Le capteur-tige, qui fonctionne selon le principe différentiel, dispose de deux éléments Hall décalés dans l'espace suivant un plan axial ou un plan radial (figure 3, S1 et S2). Ces éléments génèrent un signal de sortie proportionnel à la différence de flux entre les deux points de mesure. A cet effet, il est cependant nécessaire d'utiliser un diaphragme perforé (figure 3a) ou un disque-cible à deux pistes (figure 3b), afin de pouvoir générer

dans chacun des deux éléments Hall un signal de sens opposé (figure 4).

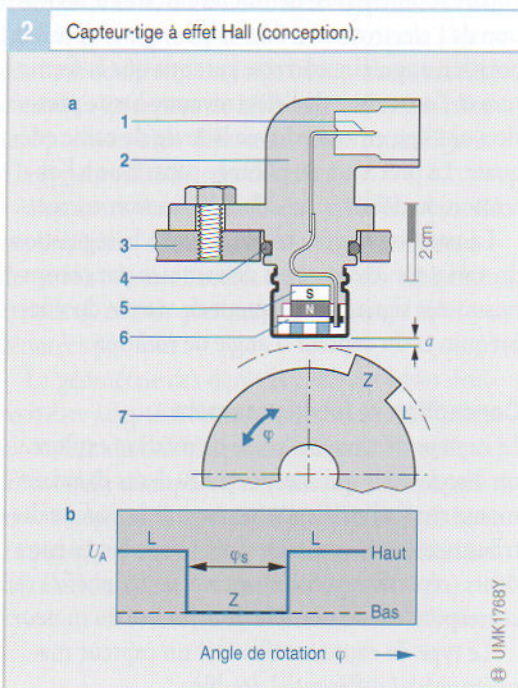
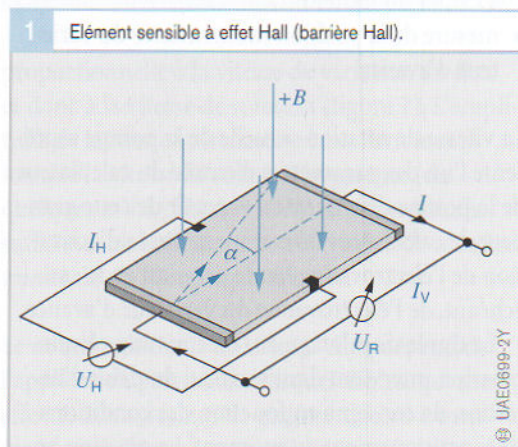
Ce type de capteur est mis en œuvre lorsqu'il s'agit de répondre à des exigences sévères en matière de précision. Ses autres avantages sont une plage d'entrefer plus large et une bonne compensation thermique.

Figure 1

- $I$  courant traversant la plaquette
- $I_H$  courant de Hall
- $I_V$  courant d'alimentation
- $U_H$  tension de Hall
- $U_R$  tension longitudinale appliquée
- $B$  induction magnétique
- $\alpha$  déviation des électrons par le champ magnétique

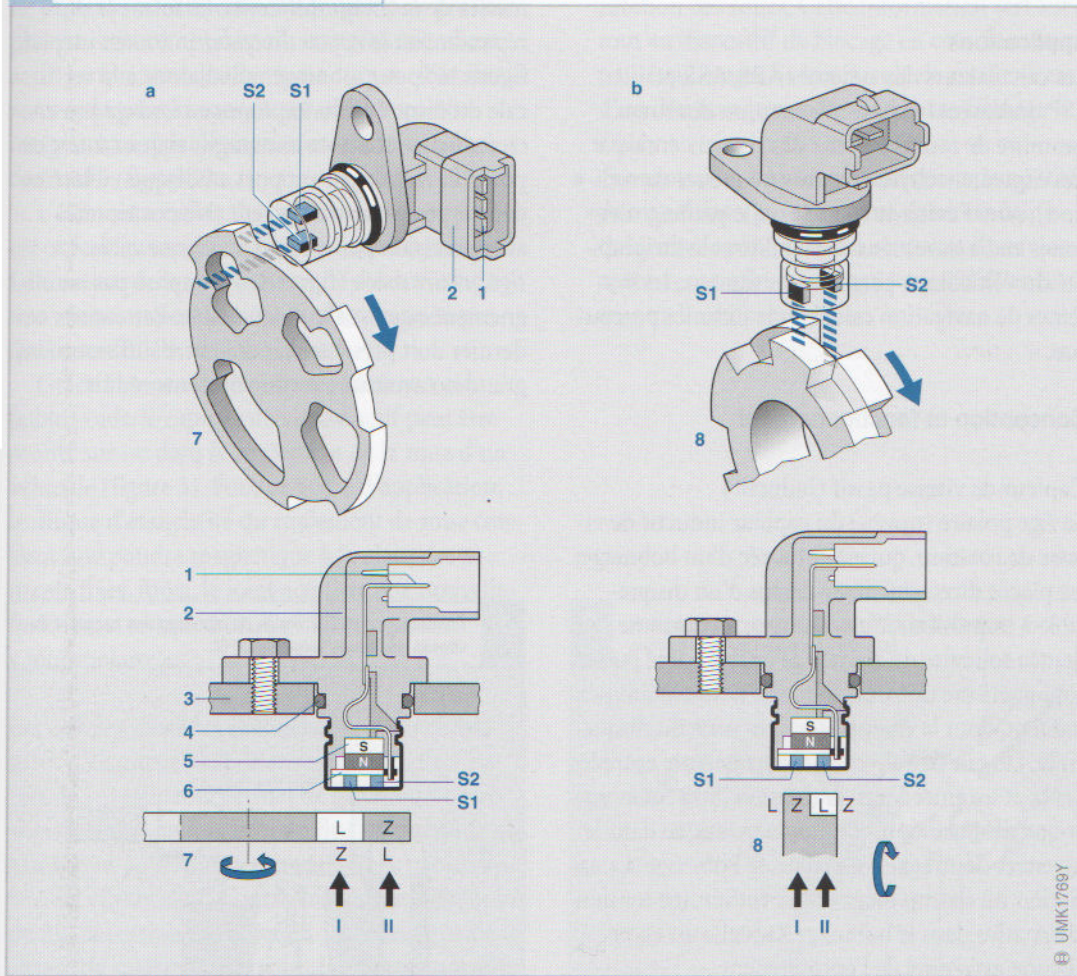
Figure 2

- a positionnement du capteur et de la roue-cible monopiste
  - b évolution du signal de sortie  $U_A$
- 1 connexion électrique (fiche)
  - 2 boîtier du capteur
  - 3 carter moteur
  - 4 joint
  - 5 aimant permanent
  - 6 C.I. Hall
  - 7 roue-cible avec dent/segment (Z) et entrefer (L)
- a entrefer  
 $\varphi$  angle de rotation





3 Capteurs-tiges différentiels à effet Hall.

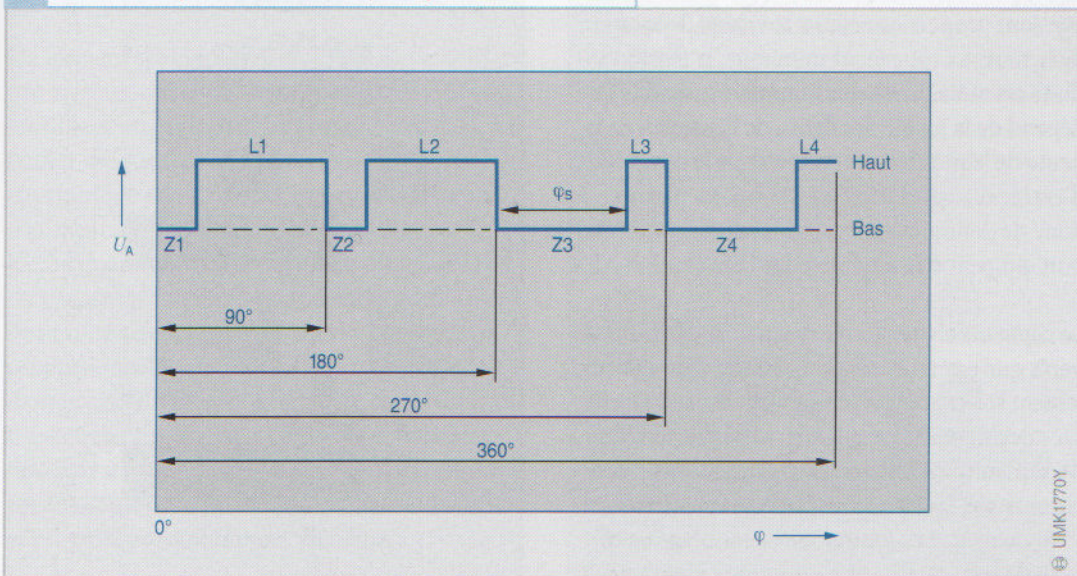


**Figure 3**  
 a captage axial (diaphragme perforé)  
 b captage radial (disque-cible à deux pistes)

1 connexion électrique (fiche)  
 2 boîtier du capteur  
 3 carter moteur  
 4 joint  
 5 aimant permanent  
 6 C.I. différentiel à éléments de Hall S1 et S2  
 7 diaphragme perforé  
 8 disque-cible à deux pistes  
 I piste 1  
 II piste 2

UMK1769Y

4 Evolution du signal de sortie  $U_A$  d'un capteur-tige différentiel à effet Hall.



**Figure 4**  
 Signal de sortie « bas » :  
 matériau (Z) en face de S1,  
 lumière (L) en face de S2.

Signal de sortie « haut » :  
 lumière (L) en face de S1,  
 matériau (Z) en face de S2.

$\varphi_s$  largeur du signal

UMK1770Y



## Capteurs de vitesse des roues

### Applications

Les calculateurs des systèmes ABS, ASR et ESP déduisent la vitesse de rotation des roues (nombre de tours) à partir des signaux émis par des capteurs tachymétriques (fréquence de rotation), afin d'éviter le blocage ou le patinage des roues et d'assurer ainsi la stabilité et la dirigeabilité du véhicule. A partir de ces signaux, les systèmes de navigation calculent la distance parcourue.

### Conception et fonctionnement

#### Capteur de vitesse passif (inductif)

La tige polaire (noyau) du capteur inductif de vitesse de rotation, qui est entourée d'un bobinage, est placée directement au-dessus d'un disque-cible à impulsions, c'est-à-dire une couronne dentée solidaire du moyeu de roue. La tige polaire à magnétisme doux est solidaire d'un aimant permanent, dont le champ atteint la zone du disque-cible. Du fait de l'alternance permanente entre les dents et les entredents, la rotation de la roue provoque des variations du flux magnétique dans le noyau et donc également dans le bobinage. La variation du champ magnétique induit une tension alternative dans le bobinage, laquelle est captée à chaque extrémité de l'enroulement.

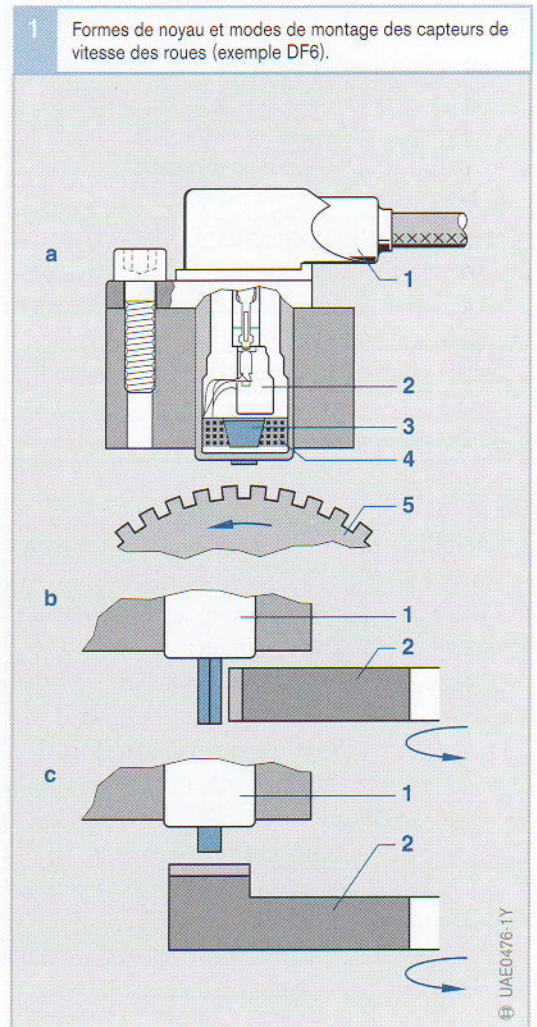
La fréquence et l'amplitude de la tension alternative sont proportionnelles à la vitesse de rotation de la roue. La roue étant immobile, la tension induite est nulle. La vitesse minimale mesurable dépend de la forme des dents, de l'entrefer, de la pente de la montée en tension et de la sensibilité d'entrée du calculateur. Ce paramètre permet donc de définir la vitesse minimale de commutation qui peut être atteinte pour l'application ABS.

Le capteur de vitesse et le disque-cible ne sont séparés que par un entrefer d'environ 1 mm étroitement tolérancé, afin de garantir le captage efficace des signaux. Par ailleurs, la fixation solide du capteur de vitesse empêche la distorsion des signaux par les vibrations générées au niveau du frein de roue. Les conditions de montage au niveau de la roue n'étant pas toujours identiques,

il a fallu concevoir des formes de noyau et des modes de montage différents. La forme la plus répandue est le *noyau dit en burin* (ou en méplat, figure 1a) pour montage radial, donc à la verticale du disque-cible. Le *noyau en losange* (ou en croix, figure 1b) pour montage axial se trouve en position radiale par rapport au disque-cible. Ces deux types de noyau doivent être positionnés avec précision par rapport au disque-cible. La *tige polaire ronde* (figure 1c) n'impose pas un alignement exact sur le disque-cible. Par contre, ce dernier doit présenter un diamètre suffisamment grand ou avoir un nombre de dents réduit.

Figure 1

- a noyau en forme de burin, montage radial, captage radial
- b noyau en forme de losange, montage axial, captage radial
- c noyau rond, montage radial, captage axial
- 1 boîtier et connexion électrique
- 2 aimant permanent
- 3 noyau en fer doux (tige polaire)
- 4 enroulement
- 5 disque-cible





### Capteur de vitesse actif

Le capteur inductif conventionnel est de plus en plus souvent remplacé par un capteur de vitesse actif. La fonction des dents du disque-cible est assurée par des aimants à polarité alternative intégrés à ce type de capteur et solidaire d'une couronne (figure 2).

L'élément sensible du capteur de vitesse actif est exposé au champ magnétique de ces aimants. La rotation de la couronne multipolaire induit une variation permanente du flux magnétique qui traverse l'élément sensible.

Grâce à son encombrement réduit et à son faible poids, le capteur de vitesse actif peut être monté sur ou dans le roulement de la roue d'un véhicule (figure 3). Pour ce genre d'application, le disque d'étanchéité du roulement de roue contient une poudre magnétique à la place des aimants fixes. Ainsi, le joint acquiert une nouvelle fonction et se transforme en un composant « multipolaire ».

Les cellules sensibles sont généralement constituées d'éléments Hall ou magnétorésistifs. Chacun de ces éléments permet de générer une tension qui varie en fonction du flux magnétique qui le traverse. La tension est transformée par le capteur de vitesse actif. Contrairement au capteur inductif, la tension à évaluer est indépendante de la vitesse de rotation de la roue. Il est donc possible de mesurer la vitesse de la roue quasiment jusqu'à son immobilisation.

Un élément typique du capteur de vitesse actif est son amplificateur, les deux composants – élément sensible et amplificateur – étant intégrés dans un boîtier unique. Le capteur est relié au calculateur électronique par un câble bipolaire. Sa tension d'alimentation est comprise entre 4,5 et 20 V. L'information de vitesse, qui est matérialisée par un courant bien précis, est transmise par l'un des deux conducteurs. La fréquence du courant est proportionnelle à la vitesse de la roue, comme dans le cas du capteur inductif. Ce mode de transmission de signaux numériques préconditionnés est nettement moins soumis aux tensions parasites que dans le cas d'un capteur inductif et offre des possibilités plus étendues :

- Transmission de l'information sur le sens de rotation des roues. Cette information sert surtout au dispositif de blocage en côte, fonctionnalité qui empêche le véhicule de reculer lors d'un démarrage en côte grâce à un freinage ciblé.
- Transmission d'une information sur la qualité du signal émis par le capteur, fonctionnalité qui incite le conducteur à contacter le service après-vente, afin de prévenir une défaillance éventuelle du capteur.

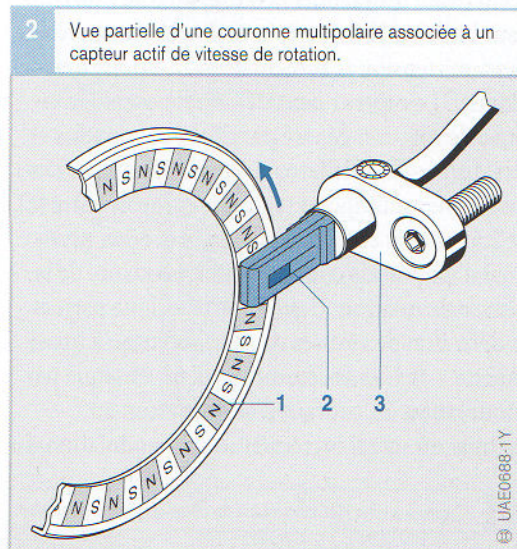


Figure 2

- 1 couronne multipolaire
- 2 cellule de mesure
- 3 boîtier du capteur

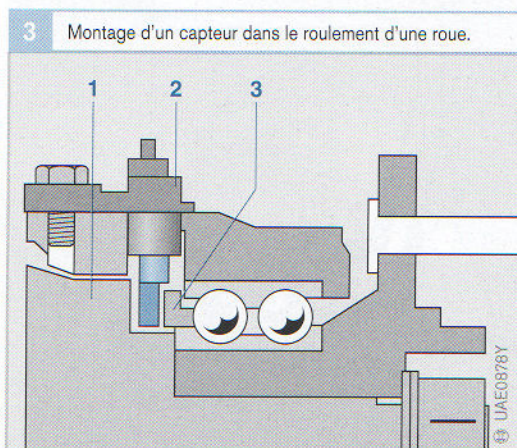


Figure 3

- 1 roulement de roue
- 2 capteur
- 3 disque d'étanchéité/multipolaire



## Capteurs tachymétriques de boîtes de vitesses

### Applications

Les capteurs tachymétriques RS (Rotational Speed Sensor) détectent la vitesse de rotation des boîtes automatiques, semi-automatiques et à variation continue (CVT). Leur conception étanche permet leur utilisation dans l'huile AFT pour boîtes de vitesses. Le « concept de compactage » prévoit leur intégration au module de commande de la boîte de vitesses ou en version indépendante. La tension d'alimentation  $U_V$  est comprise entre 4,5 et 16,5 V et la plage de températures s'étend de  $-40$  à  $+150$  °C.

### Conception et fonctionnement

Le capteur tachymétrique actif dispose d'un C.I. à effet Hall différentiel et d'une interface de courant bifilaire. Il doit être raccordé à une source de tension (tension d'alimentation  $U_V$ ) pour fonctionner. Le capteur peut détecter le signal de vitesse de rotation généré par des roues dentées et des disques en tôle ferromagnétiques ou par des couronnes multipôles (entrefer compris entre 0,1 et 2,5 mm). Il exploite l'effet Hall et émet un signal d'amplitude constante, indépendante de la vitesse de rotation. Cette caractéristique permet la détection de vitesses de rotation jusqu'à quasiment  $n = 0$ . L'émission du signal est obtenue par modulation du courant d'alimentation au rythme du signal incrémentiel. La modulation du

courant (basse : 7 mA, haute : 14 mA) est ensuite convertie par une résistance de mesure  $R_M$  intégrée au calculateur en une tension de signal  $U_{RM}$  (figure 1).

Il existe deux versions de capteurs tachymétriques de boîtes de vitesses (figure 2) :

#### RS50

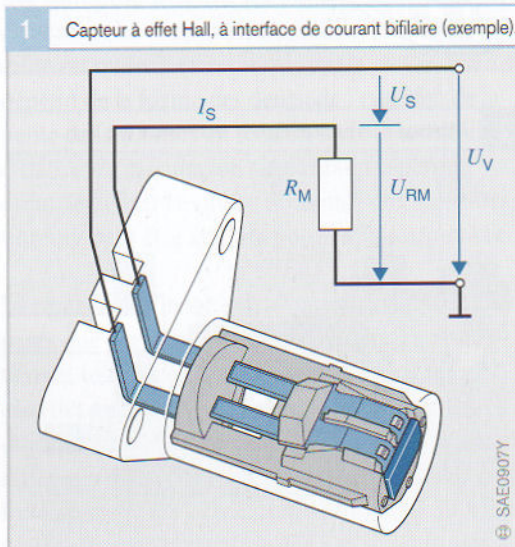
Protocole de données : information de vitesse de rotation matérialisée par un signal rectangulaire. Fonctionnalités : signal de fréquence qui est déclenché par le disque-cible passant devant le capteur et proportionnel à la vitesse d'impulsion.

#### RS51

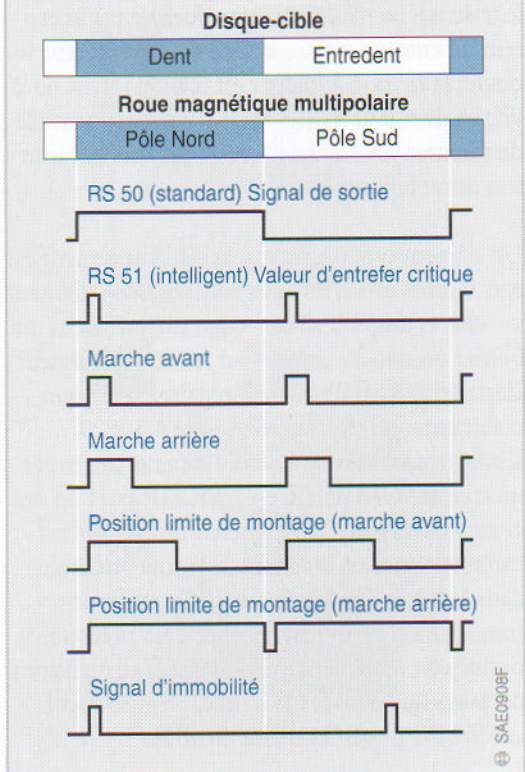
Protocole de données : information de vitesse de rotation matérialisée par un signal rectangulaire et informations complémentaires transmises par des signaux à largeur d'impulsion modulée (LIM). Fonctionnalités : signal tachymétrique ; détection d'immobilisation, du sens de rotation, de la réserve d'entrefer et de la position de montage.

Figure 1

- $I_S$  courant capteur (alimentation et signal)
- $R_M$  résistance de mesure (intégrée au calculateur)
- $U_{RM}$  tension du signal
- $U_V$  tension d'alimentation
- $U_S$  tension capteur



2 Evolution et teneur en informations du signal de sortie des diverses versions de capteurs.





## Porte-injecteur avec capteur de déplacement d'aiguille

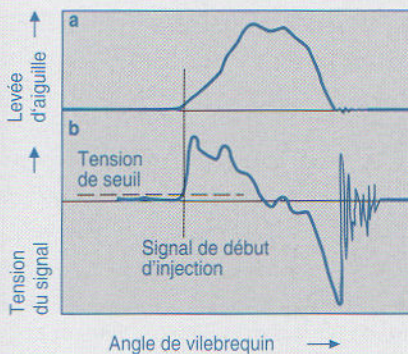
### Applications

Le début de l'injection constitue un paramètre essentiel pour le fonctionnement optimal d'un moteur diesel. La saisie de ce paramètre permet de réaliser p. ex. la variation de l'avance en fonction de la charge et de la vitesse de rotation dans une boucle de régulation fermée. A cet effet, il est nécessaire d'utiliser, en association avec une pompe d'injection en ligne ou distributrice, un porte-injecteur équipé d'un capteur de déplacement d'aiguille (figure 2) qui émet un signal à la levée de l'aiguille de l'injecteur.

### Conception et fonctionnement

Un courant d'environ 30 mA traverse la bobine du capteur (figure 2, rep. 11), ce qui génère un champ magnétique. La tige-poussoir prolongée (12) plonge dans l'écrou de guidage (9). La longueur de pénétration « X » détermine le niveau du flux magnétique dans la bobine du capteur. Tout mouvement de l'aiguille de l'injecteur induit, par suite de la variation du flux magnétique dans le solénoïde, une tension de signal (figure 1) dépendant de la vitesse, qui est traitée directement par un circuit d'exploitation du calculateur. Le dépassement d'une tension de seuil sert au circuit d'exploitation en tant que signal de début d'injection.

1 Signal d'un capteur de déplacement d'aiguille.



UMK1427-1F

2 Porte-injecteur à deux ressorts avec capteur de déplacement d'aiguille pour moteur à injection directe.

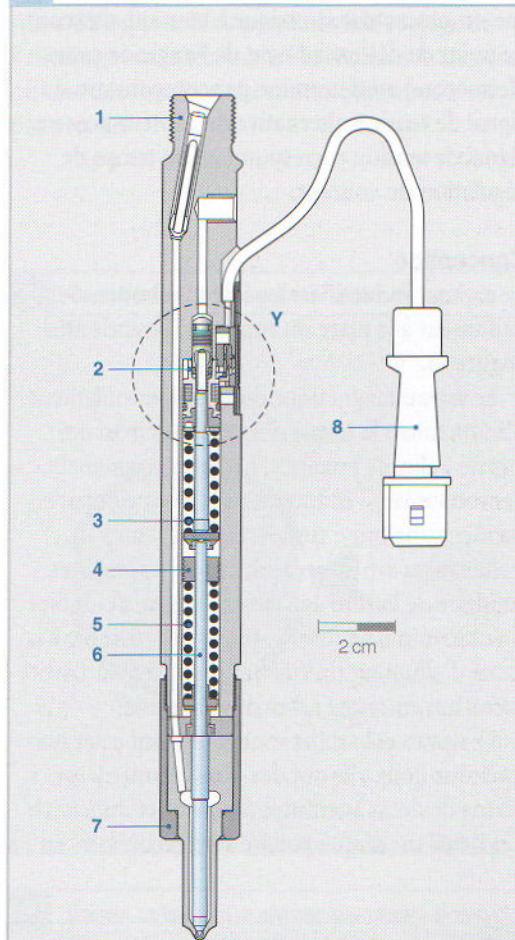


Figure 1

- a courbe de levée d'aiguille
- b courbe correspondante de la tension de signal générée par la bobine

Figure 2

- 1 corps-support
- 2 capteur de déplacement d'aiguille
- 3 ressort de pression
- 4 rondelle de guidage
- 5 ressort de pression
- 6 poussoir
- 7 écrou-raccord
- 8 connexion vers le circuit d'exploitation
- 9 écrou de guidage
- 10 patte de contact
- 11 bobine de capteur
- 12 tige-poussoir
- 13 cuvette des ressorts
- X longueur de pénétration

UMK1718-2Y



## Capteur inductif pour allumage transistorisé

### Applications

Ce capteur inductif est un déclencheur d'impulsions pour l'allumage transistorisé TZ-I. Il constitue un générateur électrique à courant alternatif. Le point de déclenchement de l'angle de came (fermeture) est déterminé par comparaison du signal de tension alternative du capteur avec un signal de tension correspondant au temps de régulation du courant.

### Conception

Le capteur inductif est logé dans le boîtier de l'allumeur à la place du rupteur conventionnel (figure 1).

Le noyau magnétique doux de l'enroulement d'induction a la forme d'un disque circulaire appelé « disque polaire ». L'aimant permanent, l'enroulement d'induction et le disque polaire forment une unité compacte, le « stator ».

Le noyau synchroniseur, appelé « rotor » et solidaire de l'arbre de l'allumeur, tourne en face de cette unité. Le rotor – qui est comparable à la came d'allumage du rupteur – est fixé sur l'arbre creux qui entoure l'arbre de l'allumeur.

Le noyau et le rotor sont réalisés en acier magnétique doux ; ils ont des prolongements en forme de dents (dentures du stator et du rotor). Les dents du disque polaire sont recourbées en

angle droit vers le haut à l'extérieur, alors que celles du rotor sont recourbées vers le bas.

Le nombre de dents du rotor et du disque polaire correspond généralement au nombre de cylindres du moteur. Quand elles sont face à face, les dents fixes et les dents mobiles sont distantes les unes des autres d'environ 0,5 mm.

### Fonctionnement

Le principe de fonctionnement est caractérisé par la variation périodique de l'entrefer qui existe entre les dents du rotor et celles du stator. Le flux magnétique varie donc également en fonction de l'entrefer. La variation du flux induit une tension alternative dans l'enroulement d'induction. La tension de crête  $\pm \hat{U}_S$  est alors proportionnelle à la vitesse de rotation : environ 0,5 V à basse vitesse et environ 100 V à grande vitesse. La fréquence  $f$  de cette tension alternative correspond au nombre d'étincelles d'allumage à la minute (figure 2), d'où :

$$f = z \cdot n / 2$$

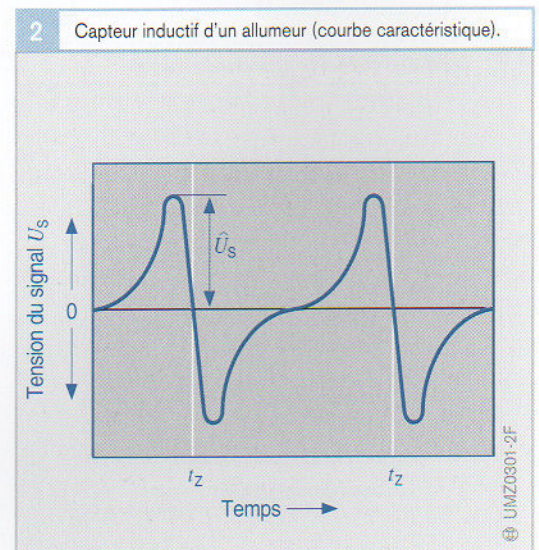
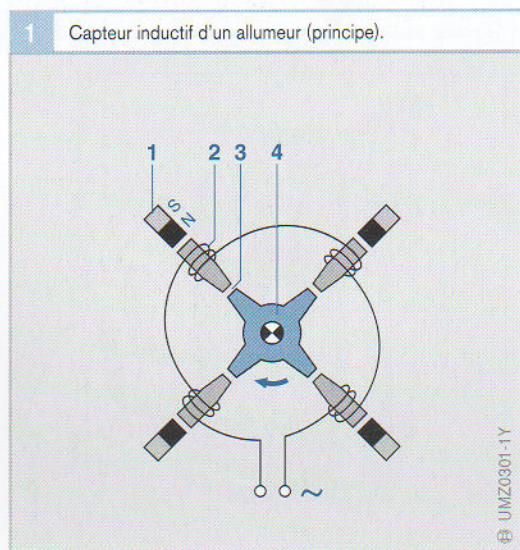
$f$  fréquence ou nombre d'étincelles par minute,  
 $z$  nombre de cylindres,  $n$  vitesse de rotation du moteur (tr/min).

Figure 1

- 1 aimant permanent
- 2 enroulement d'induction et noyau
- 3 entrefer variable
- 4 rotor

Figure 2

- $U_S$  tension du signal  
 $\hat{U}_S$  tension de crête  
 $t_z$  point d'allumage





## Capteur Hall pour allumage transistorisé

### Applications

Ce capteur Hall est un déclencheur d'impulsions pour l'allumage transistorisé TZ-H. Le signal de cette « barrière Hall » intégrée à l'allumeur correspond, quant à sa teneur en informations, au signal de l'allumage conventionnel par bobine commandé par contacts : tandis que le rupteur de l'allumeur détermine l'angle de fermeture à l'aide de la came d'allumage, le capteur Hall génère le rapport cyclique d'impulsions au moyen de son rotor à écrans.

### Conception

Le capteur Hall (figure 1) est intégré à l'allumeur. Sa barrière magnétique est montée sur le plateau-support mobile. Le C.I. Hall se trouve sur un support en céramique. Le circuit et l'une des pièces conductrices sont enrobés de plastique afin d'assurer une protection efficace contre l'humidité, la saleté et les dégâts mécaniques. Les pièces conductrices et le rotor à écrans sont réalisés en matériau magnétique doux. Le nombre d'écrans est égal au nombre de cylindres. La largeur  $b$  des différents écrans peut déterminer, en fonction du module électronique utilisé, l'angle de fermeture maximal de ce système d'allumage. De ce fait, l'angle de fermeture reste pratiquement constant pendant toute la durée de vie du capteur Hall et sa correction n'est donc pas nécessaire.

### Fonctionnement

Les écrans du rotor passent sans contact par l'entrefer de la barrière Hall lorsque l'arbre de l'allumeur tourne. Quand l'entrefer est libre, le C.I. Hall incorporé et l'élément sensible Hall sont traversés par le champ magnétique (figure 1). La densité du flux magnétique est élevée sur l'élément sensible et la tension Hall est à son maximum. Le C.I. Hall est activé. Dès que l'un des écrans traverse l'entrefer, la majeure partie du flux magnétique se disperse dans l'écran et s'écarte ainsi du C.I. L'élément sensible Hall n'est plus exposé qu'à un tout petit reste du flux d'induction magnétique qui provient du champ de dispersion. La tension Hall est à son minimum. La forme du rotor à écrans détermine l'angle de

fermeture par génération d'une tension de rampe à partir de la tension du signal  $U_S$  (tension Hall convertie, figure 2). L'évolution du point de déclenchement de l'angle de fermeture suit cette tension de rampe.

La conception et le principe de fonctionnement du capteur Hall permettent le réglage de l'allumage sur le moteur à l'arrêt, dans la mesure où une déconnexion du courant de repos n'est pas prévue.

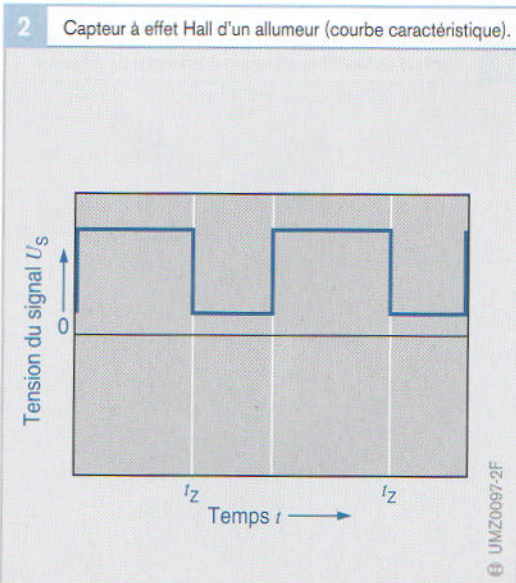
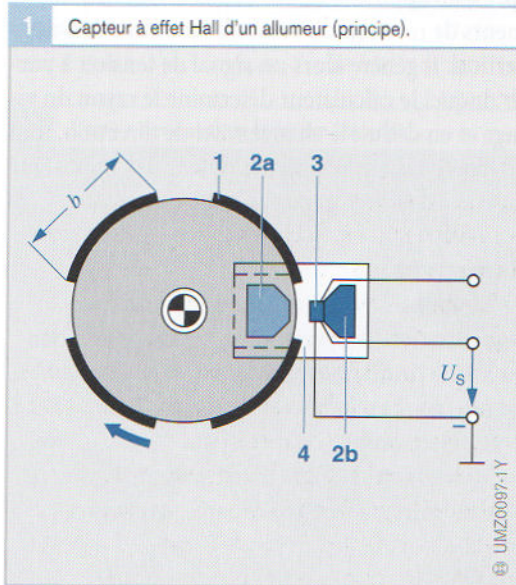


Figure 1

1 écran de largeur  $b$   
 2a aimant permanent  
 2b pièces conductrices en matériau magnétique doux  
 3 C.I. Hall  
 4 entrefer  
 $U_S$  tension du signal (tension Hall convertie)

Figure 2

$U_S$  tension du signal (tension Hall convertie)  
 $t/2$  point d'allumage



## Capteur de lacet piézo-électrique à diapason

### Applications

Le calculateur d'un système de navigation automobile a besoin d'informations sur les mouvements du véhicule, afin qu'il puisse suivre le trajet parcouru au moyen d'une carte routière numérique mémorisée sur un disque CD-ROM (navigation à l'estime).

Le capteur de lacet, qui est intégré aux composants de navigation, détecte dans les virages (p. ex. à l'approche de croisements) les mouvements de rotation du véhicule autour de son axe vertical. Il génère alors un signal de tension à partir duquel le calculateur détermine le rayon du virage et en déduit le changement de direction, tout en tenant compte du signal venant de l'indicateur de vitesse ou du capteur de vitesse de roue.

### Conception

Le capteur d'angle de rotation (appelé aussi « gyromètre ») est constitué d'un corps en acier en forme de diapason portant quatre piézoéléments (deux en haut et deux en bas, figure 1) et d'une électronique de détection.

Insensible aux perturbations magnétiques, ce capteur effectue une mesure très précise.

### Fonctionnement

À l'application d'une tension, les piézoéléments inférieurs commencent à vibrer et excitent à leur tour les piézoéléments des fourches supérieures du diapason qui génèrent des vibrations dans le sens opposé.

#### Parcours en ligne droite

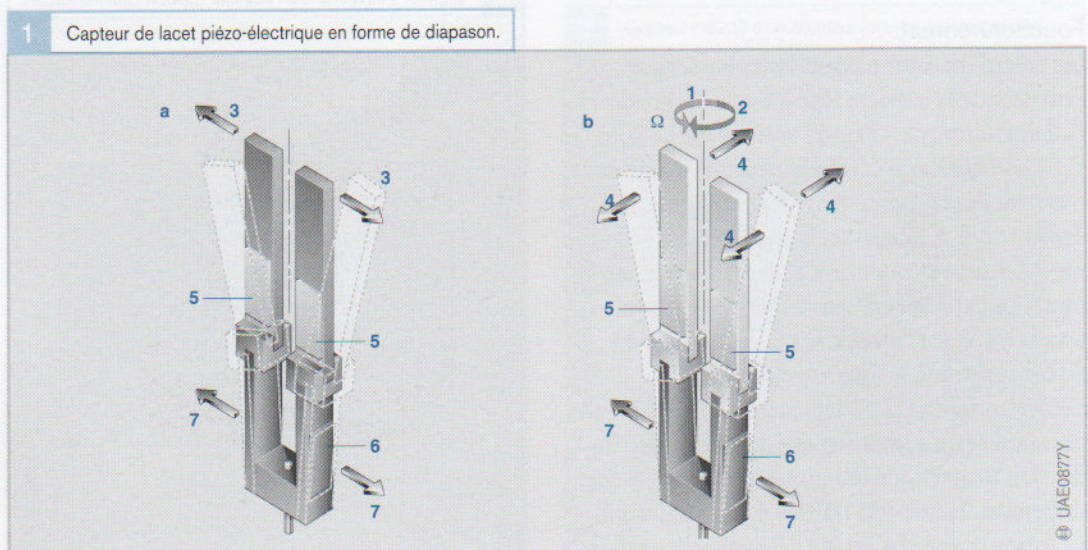
Dans ce cas, aucune accélération de Coriolis n'agit sur le diapason. Les piézoéléments supérieurs oscillent toujours en sens inverse et n'étant sensibles que perpendiculairement au sens des vibrations (figure 1a), ils ne génèrent aucune tension.

#### Parcours en virage

L'accélération de Coriolis, qui se manifeste lors d'une rotation en liaison avec le mouvement vibratoire (mais perpendiculaire à ce dernier), est utilisée pour la mesure en virage. Le mouvement de rotation provoque alors le déplacement des fourches supérieures du diapason hors du plan de vibration (figure 1b). Les piézoéléments supérieurs génèrent ainsi une tension alternative qui est transmise au calculateur de navigation par l'intermédiaire d'une électronique intégrée au boîtier du capteur. L'amplitude du signal de tension dépend aussi bien de la vitesse de lacet que de la vitesse d'oscillation, son signe étant fonction du sens de rotation du virage.

Figure 1

- a déplacement en cas de parcours en ligne droite
- b déplacement en cas de parcours en virage
- 1 sens d'oscillation du diapason résultant d'un parcours en virage
- 2 sens de rotation du véhicule
- 3 sens d'oscillation du diapason résultant d'un parcours en ligne droite
- 4 force de Coriolis
- 5 piézoéléments supérieurs (détection)
- 6 piézoéléments inférieurs (activation)
- 7 sens générateur d'oscillations
- $\Omega$  vitesse de lacet





## Capteurs de lacet piézo-électriques (« gobelets » oscillants)

### Applications

Les capteurs de lacet ou de vitesse de lacet (appelés aussi « gyromètres »), qui équipent les véhicules à régulation de la dynamique de roulage, détectent les mouvements de rotation du véhicule autour de son axe vertical, p. ex. dans les virages et en cas de risque d'embarquée ou de dérapage.

### Conception et fonctionnement

Les capteurs de lacet piézo-électriques sont des détecteurs mécaniques de précision. Un cylindre creux métallique est excité et maintenu en résonance dans le sens radial par deux céramiques piézo-électriques 1-1' disposées face à face sur le cylindre. Une deuxième paire 2-2' disposée à 90° de la première stabilise l'oscillation à une amplitude constante. Quatre nœuds d'oscillation apparaissent dans le sens axial à 45° du sens d'excitation (figures 1 à 3).

En cas de rotation à la vitesse de lacet  $\Omega$  autour de l'axe du cylindre, les nœuds se déplacent légèrement à la périphérie sous l'effet de l'accélération de Coriolis, si bien que des forces proportionnelles à la vitesse de rotation, qui sont détectées par une troisième paire de céramiques piézo-électriques 3-3', apparaissent dans les nœuds qui sont normalement inactifs. Une quatrième paire

4-4' mise en excitation et une boucle de régulation fermée ramènent toutefois la tension résultante à la valeur de référence  $U_{ref} = 0$ . Après un soigneux filtrage par un redresseur à détection de phase, on obtient un signal de sortie extrêmement précis qui sert également de grandeur réglante. Pour contrôler l'ensemble du système de mesure (test intégré), il suffit de régler passagèrement et de façon ciblée la consigne à la valeur  $U_{ref} = 0$ . La dérive thermique de ce type de capteur impose la présence d'un circuit de compensation. L'inévitable altération dans le temps des caractéristiques du matériau constituant les éléments piézo-électriques oblige par ailleurs à réaliser un pré-vieillissement soigné.

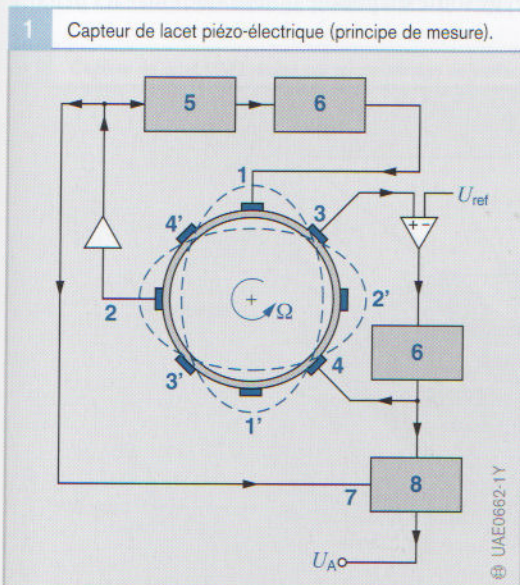
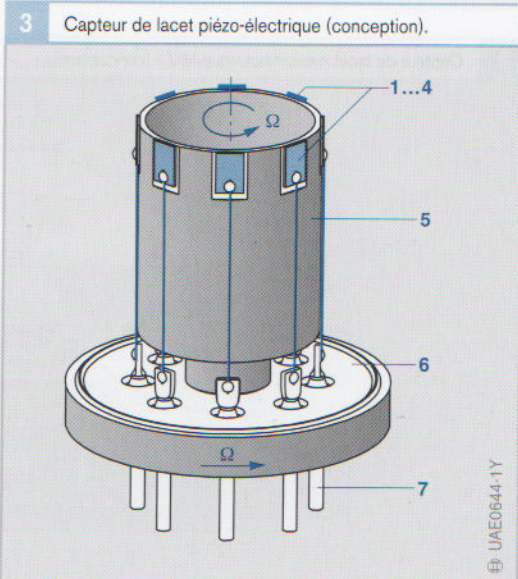
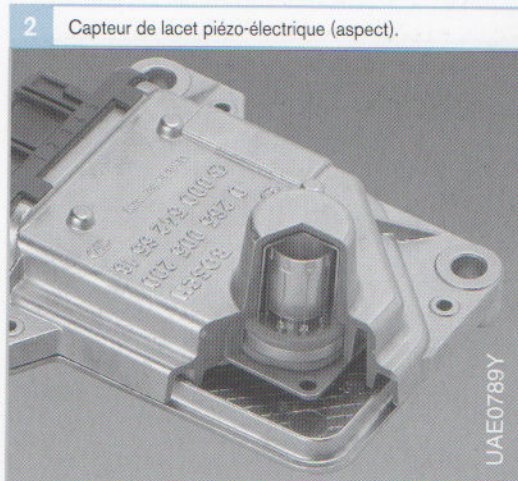


Figure 1

- 1...4 piézoéléments
- 5 circuit de commande
- 6 filtre passe-bande (à phase fixe)
- 7 référence de phase
- 8 redresseur (à phase sélective)
- $U_A$  tension de sortie
- $\Omega$  vitesse de lacet
- $U_{ref} = 0$  (fonctionnement normal)
- $U_{ref} \neq 0$  (test intégré)

Figure 3

- 1...4 couples de piézo-éléments
- 5 cylindre oscillant
- 6 embase
- 7 broches de connexion
- $\Omega$  vitesse de lacet



## Capteurs de lacet micromécaniques

### Applications

Les capteurs de lacet ou de vitesse de lacet micromécaniques au silicium (appelés aussi « gyro-mètres »), qui équipent les véhicules à contrôle dynamique de trajectoire ESP, détectent les mouvements de rotation du véhicule autour de son axe vertical, p. ex. dans les virages normaux et en cas de risque d'embarquée ou de dérapage.

Les détecteurs mécaniques de précision utilisés jusqu'à présent sont en passe d'être supplantés par ces capteurs micromécaniques plus compacts et plus économiques.

### Conception et fonctionnement

#### Capteur de lacet micromécanique MM1

Afin d'obtenir la haute précision requise par les systèmes de contrôle dynamique de trajectoire, ces nouveaux capteurs font appel à une technologie mixte : deux masses sismiques épaisses, gravées dans la tranche de silicium par micro-usinage de volume, oscillent en opposition de phase à une fréquence spécifique (fréquence de résonance  $> 2$  kHz.) déterminée par leur masse et leur rigidité élastique. Chaque masse vibrante supporte un accéléromètre capacitif minuscule, réalisé par micro-usinage de surface, capable de détecter les accélérations de Coriolis au niveau de la tranche de silicium lorsque le circuit intégré tourne autour de son axe vertical à la vitesse  $\Omega$  (figures 1 et 2). Ces accélérations sont proportionnelles au produit de la vitesse de lacet par la vitesse de vibration maintenue constante électriquement.

Le circuit d'excitation est constitué d'une simple piste conductrice disposée sur la masse vibrante. Exposée à un champ magnétique permanent  $B$ , la piste conductrice subit l'action d'une force de Lorentz perpendiculaire à la surface du C.I. qui fait entrer les masses en vibration. Une autre piste conductrice toute aussi simple et compacte, soumise au même champ magnétique, mesure directement la vitesse de vibration par couplage inductif. La différence de nature physique entre les systèmes « excitation » et « détection » évite toute diaphonie indésirable entre les deux

Figure 1

- 1 ressort de maintien/guidage
- 2 partie de la masse vibrante
- 3 capteur d'accélération de Coriolis

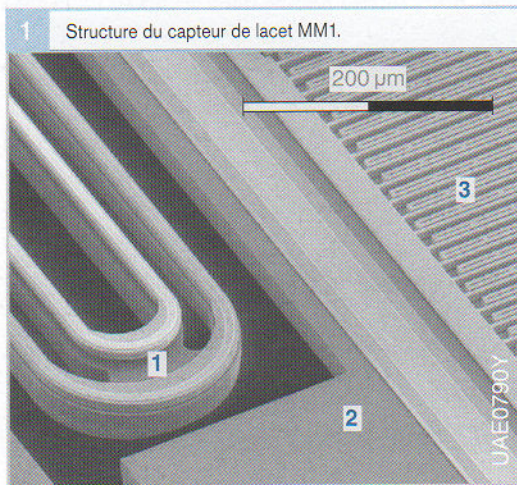
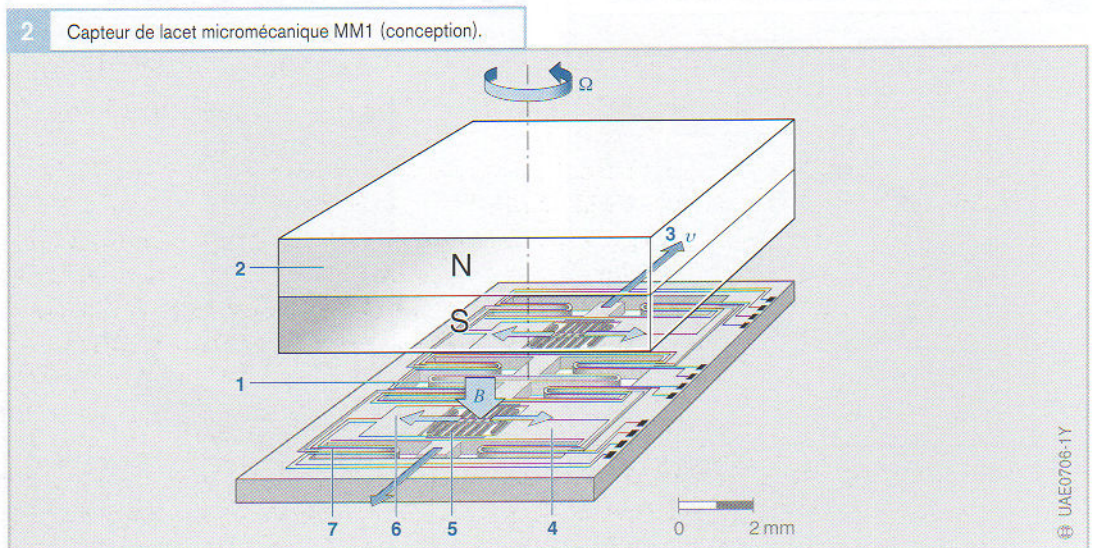


Figure 2

- 1 ressort de couplage déterminant la fréquence
  - 2 aimant permanent
  - 3 sens de vibration
  - 4 masse vibrante
  - 5 capteur d'accélération de Coriolis
  - 6 sens de l'accélération de Coriolis
  - 7 ressort de maintien/guidage
- $\Omega$  vitesse de lacet  
 $v$  vitesse de vibration  
 $B$  champ magnétique permanent



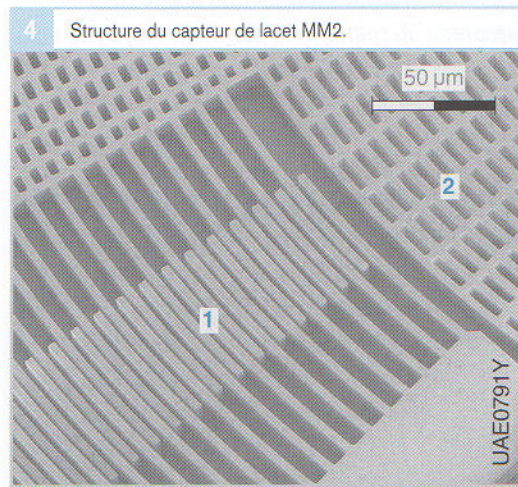


parties. Pour supprimer l'effet des accélérations externes indésirables, les deux signaux de mesure en opposition de phase (signal de mode commun) sont soustraits (la somme des deux signaux donne en plus la valeur de l'accélération externe). La précision de réalisation de la structure micromécanique exclut tout effet perturbateur lié au fait que l'accélération vibratoire est plus de cent fois supérieure à l'accélération de Coriolis à mesurer (sensibilité transversale nettement inférieure à 40 dB). Le découplage mécanique et électrique des composantes d'excitation et de détection s'avère donc parfait.

Bien meilleur marché du fait de sa compacité et de sa simplicité de réalisation, ce capteur génère en raison de sa forte miniaturisation un signal de mesure encore plus faible et offre donc une moins bonne précision. La petitesse du signal oblige à disposer d'une électronique très complexe. Par contre, le mode de réalisation mécanique et la haute rigidité du système contribuent à écarter l'influence des accélérations externes parasites.

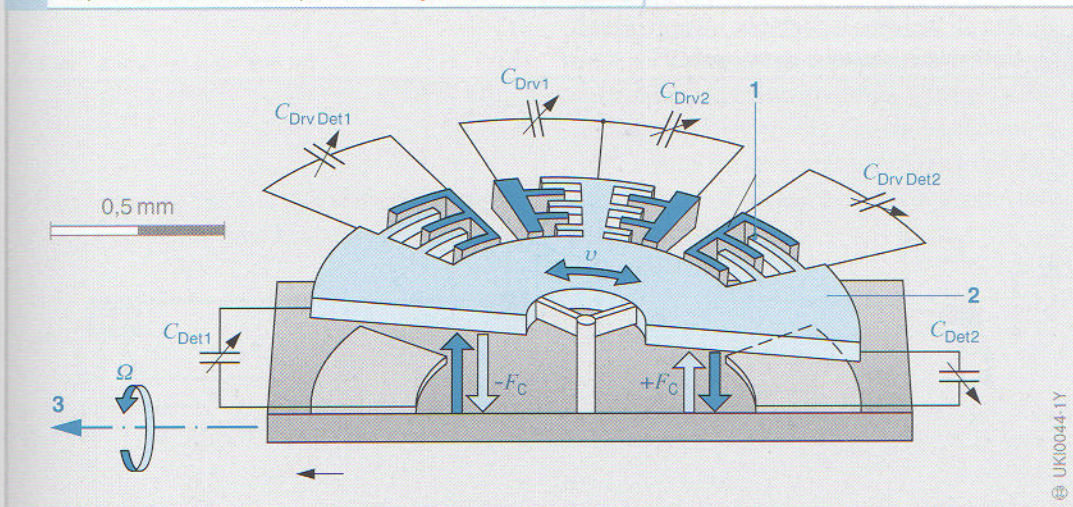
**Capteur de lacet micromécanique MM2**

La solution, qui consiste à réaliser intégralement le capteur de lacet par micro-usinage de surface et à remplacer simultanément le système magnétique d'excitation et de régulation par un système électrostatique, ne permet pas d'obtenir un découplage aussi efficace : une masse sismique suspendue en son centre est mise en résonance de façon électrostatique au moyen de structures en forme de peigne (figures 3 et 4). Une seconde structure capacitive du même type maintient l'amplitude d'oscillation constante. Les forces de Coriolis provoquent un mouvement de basculement « parasite » dont l'amplitude, proportionnelle à la vitesse de lacet  $\Omega$ , est détectée de façon capacitive par les électrodes placées sous la masse sismique. Afin que ce mouvement ne soit pas trop amorti, l'élément sensible se trouve dans le vide.



**Figure 4**  
1 structure en peigne  
2 masse sismique

**3** Capteur de lacet MM2 réalisé par micro-usinage de surface (conception).



**Figure 3**  
1 structure en peigne  
2 masse sismique  
3 axe de mesure  
 $C_{Drv}$  électrodes d'activation  
 $C_{Det}$  détection capacitive sur masse sismique  
 $F_C$  force de Coriolis  
 $v$  vitesse de vibration  
 $\Omega = \Delta C_{Det}$ , vitesse de lacet à mesurer



# Capteurs d'accélération et de vibrations

## Grandeurs de mesure

Les capteurs d'accélération (accéléromètres) et de vibrations conviennent à la régulation anticlicquetis des moteurs à combustion interne, au déclenchement des systèmes de protection des passagers (coussins gonflables, prétensionneurs, arceau de capotage) et à la détection des accélérations en virage et des variations de vitesse sur les véhicules à transmission intégrale équipés d'un système antiblocage ABS ou de contrôle dynamique de trajectoire ESP ainsi que d'un système de régulation de la suspension.

L'accélération  $a$ , qui est souvent indiquée comme multiple de l'accélération de la pesanteur  $g$  ( $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) (valeurs types des véhicules automobiles, voir tableau 1), constitue la grandeur de mesure.

1 Capteurs d'accélération et de vibrations.	
Application	Plage de mesure
Régulation du cliquetis	1 ... 10 g
Protection des passagers :	
– coussin gonflable, prétensionneur	50 g
– arceau de capotage	4 g
– blocage de ceinture	0,4 g
ABS, ESP	0,8...1,2 g
Régulation de la suspension :	
– carrosserie	1 g
– essieu	10 g

Tableau 1

Figure 1

Schéma :

- a à mesure de débattement  
b à régulation de position

- $a$  accélération mesurée  
 $x$  débattement du système  
 $F_M$  force de mesure (force d'inertie sur la masse  $m$ )  
 $F_K$  force de compensation  
 $I_A$  courant de sortie  
 $U_A$  tension de sortie

## Principes de mesure

En principe, tous les accéléromètres mesurent, en accord avec la loi fondamentale de la mécanique, les forces  $F$  exercées par l'accélération  $a$  sur des masses (inertes)  $m$ , que ce soit par mode uniquement dynamique (capteurs de vibrations) ou mode statique :

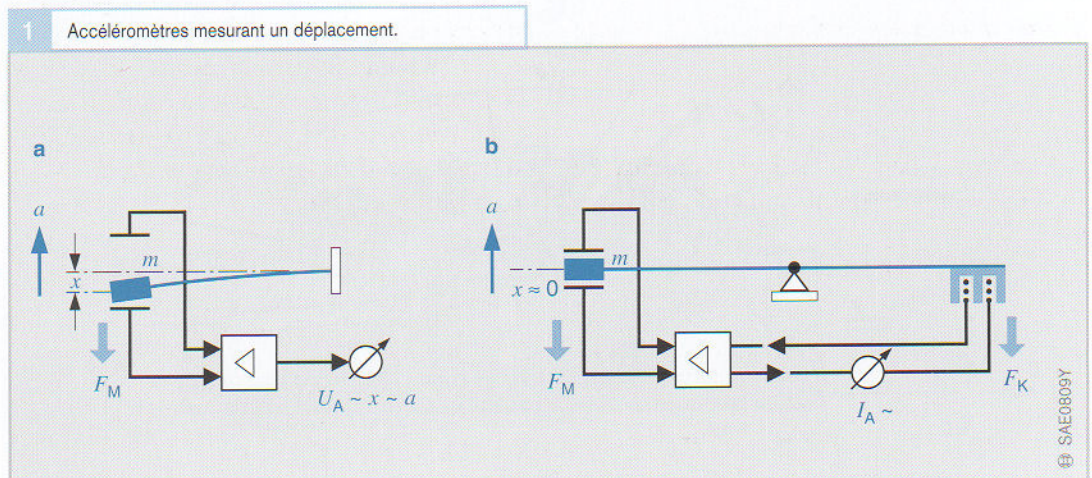
$$F = m \cdot a \quad (1)$$

Comme dans le cas de la mesure d'une force, il existe des systèmes qui détectent un déplacement et d'autres qui mesurent une déformation (contrainte) mécanique :

### Systèmes mesurant un déplacement

Les systèmes mesurant un déplacement (figure 1) sont surtout utilisés dans la plage des très faibles accélérations. Ils permettent aussi l'application du *principe de compensation* qui fait en sorte que la déviation du système due à l'accélération est compensée par une force de rappel équivalente. Ainsi, le système fonctionne pratiquement toujours – et de manière idéale – au voisinage du point zéro de la force de rappel (haute linéarité, sensibilité transversale minimale, haute stabilité thermique).

Les systèmes à « régulation de position » (figure 1b) présentent une rigidité et une fréquence limite plus élevées que les systèmes similaires mesurant un « débattement » (figure 1a).





A l'exception du « pendule à gravité », tous les capteurs d'accélération sont asservis à un ressort, c.-à-d. que la masse inerte est reliée élastiquement au corps d'épreuve, dont l'accélération doit être mesurée. En mode statique, la force d'accélération se trouve donc en équilibre avec la force de rappel du ressort pour un déplacement  $x$  :

$$F = m \cdot a = c \cdot x \quad (2)$$

où

$c$  représente le taux d'élasticité (raideur) du ressort.

La sensibilité de mesure  $S$  du système est donc donnée par l'équation :

$$S = x/a = m/c \quad (3)$$

Il en résulte donc qu'une masse importante et une faible raideur du ressort donnent une grande sensibilité de mesure. Si l'équation 2 n'est toutefois pas appliquée uniquement au mode statique, mais également au mode dynamique, on s'aperçoit qu'il ne faut seulement tenir compte de la force du ressort, mais aussi d'une force de frottement et d'une force d'inertie. Celles-ci sont proportionnelles par rapport aux dérivées du déplacement  $x$  en fonction du temps ( $p$  coefficient de frottement).

L'équation 4 qui en résulte matérialise effectivement un système oscillant (à résonance) :

$$F = m \cdot a = c \cdot x + p \cdot \dot{x} + m\ddot{x} \quad (4)$$

Si l'on considère que le frottement est négligeable ( $p \approx 0$ ), ce système a une fréquence de résonance :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (5)$$

Selon l'équation 3, la sensibilité de mesure  $S$  est donc étroitement liée à la fréquence de résonance  $\omega_0$  de la manière suivante :

$$S \cdot \omega_0^2 = 1 \quad (6)$$

Cela signifie qu'une augmentation par deux de la fréquence de résonance ne peut être obtenue qu'au prix d'une réduction par quatre de la sensibilité. Naturellement, de tels systèmes masse-ressort présentent une proportionnalité suffisamment bonne entre la grandeur de mesure et le déplacement que pour un seuil inférieur à leur fréquence de résonance.

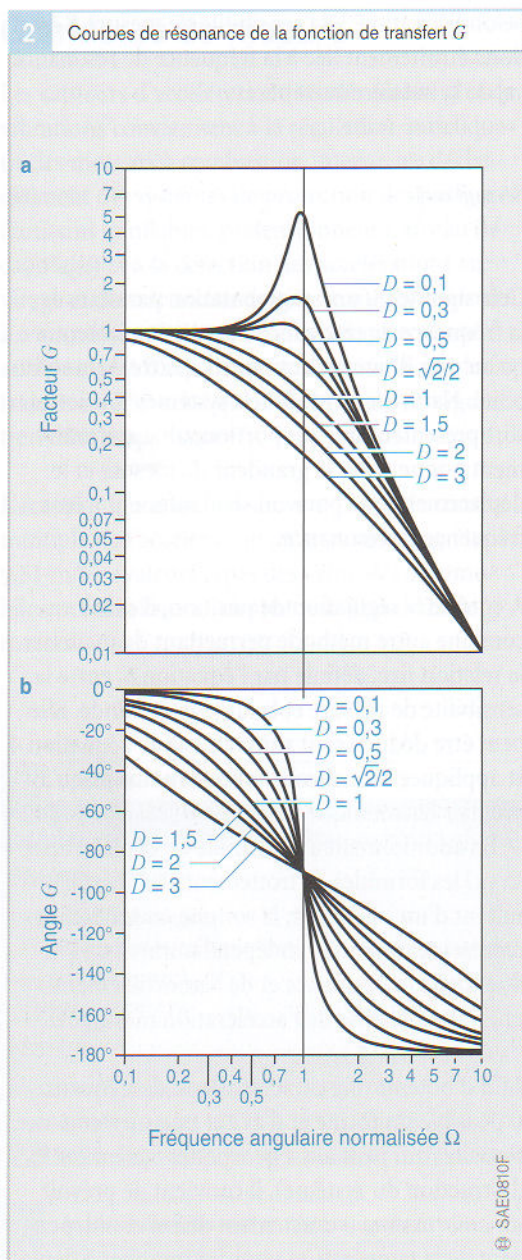
A côté de la régulation de position, il existe encore une autre méthode permettant de maîtriser la relation fixe, définie par l'équation 6, entre la sensibilité de mesure et la largeur de bande. Elle peut être déduite tout simplement de l'équation 4 et appliquée avec succès, tout au moins jusqu'au premier harmonique du système ( $2\omega_0$ ) :

En additionnant à la formule de déplacement ( $c \cdot x$ ) les formules de frottement et d'inertie résultant d'un calcul pur, la somme ainsi obtenue représente toujours - indépendamment de l'influence de la résonance et de l'amortissement - une valeur précise de l'accélération mesurée  $a$ .

Afin d'obtenir une caractéristique de fréquence si possible uniforme et d'éviter une surrésonance parasite (qui peut aussi provoquer facilement la destruction du système), il convient de prévoir un *amortissement* exactement défini et indépendant de la température pour les systèmes à déplacement pur. La normalisation du coefficient de frottement  $p$  sur les autres paramètres de l'équation 4 permet d'obtenir une valeur d'amortissement normalisée  $D$  :

$$D = \frac{p}{2 \cdot c} \cdot \omega_0 = \frac{p}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}} \quad (7)$$





**Figure 2**  
 a courbe de résonance en amplitude  
 b courbe de résonance en phase de la fonction de transfert complexe  $G(i \cdot \Omega) = \frac{[x(i \cdot \Omega)]}{[a(i \cdot \Omega)]}$   
 $x(i \cdot \Omega)$  amplitude de déplacement  
 $a(i \cdot \Omega)$  amplitude de l'excitation à l'accélération  
 $\Omega = \omega/\omega_0$  fréquence angulaire normalisée  
 $D$  amortissement

Cette valeur d'amortissement détermine largement le comportement en vibration et en résonance. Tandis que des valeurs d'amortissement  $D > 1/\sqrt{2} = 0,707$  et une excitation périodique ne produisent plus de surrésonance, des valeurs  $D > 1$  et une excitation brusque annulent toute phase d'oscillations transitoires. Afin d'obtenir une largeur de bande aussi grande que possible, les applications pratiques se basent souvent sur un compromis utilisant des valeurs admissibles  $D = 0,5$  à  $0,7$  (figure 2).

Par rapport à l'amortissement réalisé par des mélanges d'huiles aux silicones extrêmement sensibles aux variations de température, il est préférable d'utiliser un moyen d'amortissement par couche d'air qui ne présente qu'une faible dérive en température. Un amortissement électrodynamique (aimant permanent + plaque conductrice) s'avère tout aussi efficace, mais demande des moyens plus importants et nécessite un plus grand volume.

L'amortissement des systèmes à régulation de position peut être réalisé et réglé au niveau du circuit de régulation électronique. Afin de les protéger contre toute destruction à l'état désactivé et non-amorti, ces systèmes disposent de butées de surcharge très étroites, d'autant plus que leur déplacement en cours de fonctionnement reste quasiment nul.

**Compactage**

Au même titre que pour la plupart des capteurs, le conditionnement (« compactage ») sur mesure des accéléromètres joue également un rôle important pour la qualité de la détection. En tant que capteurs à inertie, ils détectent la grandeur

**2** Accéléromètres (classés suivant les modes de captage électriques et les systèmes masse-ressort).

Captage électrique	Système masse-ressort					
	Céramique		Métal		Silicium	
	piézo-électrique	isolante	Acier	CuBe	Volume	OMM <sup>1)</sup>
<b>Mesure de tension</b>						
piézorésistive (jauges extensométriques)						
piézo-électrique	X					
<b>Mesure de déplacement</b>						
Effet Hall			X			
capacitive						X

**Tableau 2** (X) Exemples actuels. <sup>1)</sup> OMM micro-usinage de surface. configuration prise en compte.



de mesure sans la moindre liaison mobile avec l'extérieur. Ils peuvent donc bénéficier d'un encapsulage hermétique. Ils doivent cependant disposer de moyens adéquats pour la réalisation d'un couplage mécanique rigide au corps d'épreuve, car des coupleurs supplémentaires, élastiques ou mobiles, risqueraient d'altérer beaucoup la mesure. Ce couplage fixe et rigide ne doit cependant transmettre au capteur les dilatations thermiques éventuelles du corps d'épreuve, ce qui aurait pour effet d'influencer les résultats des mesures.

Le tableau 2 présente une classification des différents systèmes masse-ressort et des différents modes de captage électriques. Il donne un aperçu systématique sur les possibilités de réalisation des capteurs. Des repères ont été affectés aux combinaisons actuelles (x), qui feront l'objet d'une description détaillée par la suite, ainsi qu'aux configurations dont la fabrication et la fourniture ont déjà été prises en compte (zones bleues).

Bien souvent, il suffit de la masse propre du ressort comme masse sismique pour obtenir une sensibilité de mesure suffisante. Si cela n'est pas le cas, une masse d'appoint y est ajoutée (en général, du même matériau ou sous une forme métallique).

La tendance actuelle s'oriente nettement vers des capteurs de petites dimensions, réalisés en *technologie Si-OMM à captage capacitif*. Ce type de structure dépend – surtout grâce à l'encapsulage hermétique – presque uniquement des paramètres géométriques du matériau et n'est à peine soumis à d'autres constantes du matériau et grandeurs d'influence, p. ex. à la température, etc. L'électronique locale, indispensable à ces capteurs, assure une protection efficace contre les effets électromagnétiques qui risquent de nuire à ce mode de captage.

Certes, les capacités de mesure réalisées de cette manière sont extrêmement petites, mais leur variation sous l'influence de l'accélération atteint le niveau typique de  $\pm 25\%$ . La faible consommation de courant et la possibilité de réaliser également des systèmes à régulation de position par application de forces électrostatiques (aux élec-

trodes de mesure ou à un couple d'électrodes supplémentaire) constituent les avantages de cette technique en comparaison avec d'autres solutions technologiques.

### Systèmes mesurant une déformation (contrainte) mécanique

Tandis que tous les autres modes de captage indiqués au tableau 2 sont appliqués à d'autres capteurs déjà connus, les *détecteurs piézo-électriques* utilisés en automobile (sauf les capteurs de lacet piézo-électriques) ne sont affectés qu'aux accéléromètres. C'est pour cette raison que ce principe de mesure fait ici l'objet d'une description plus détaillée :

Sous l'action de contraintes mécaniques, qui résultent de forces externes  $F$  (figure 3), des éprouvettes en matériau piézo-électrique, dont la surface est munie d'électrodes, génèrent des charges  $Q$ . Les matériaux cristallins (p. ex. un cristal de quartz) disposent de cette propriété naturelle. Les matériaux synthétiques (p. ex. la céramique piézo-électrique) doivent d'abord être polarisés par un champ électrique intense pour présenter cette propriété.

Comme dans le cas des matériaux magnétiques, cet effet piézo-électrique est subordonné à une « température de Curie », au-dessus de laquelle l'effet disparaît – de façon réversible pour les cristaux, en permanence pour les céramiques. Une telle « dépolarisation » des céramiques piézo-électriques peut aussi être due à des vibrations mécaniques intensives, qui « dérèglent » la structure du réseau de cristallites en la ramenant à sa position d'origine.

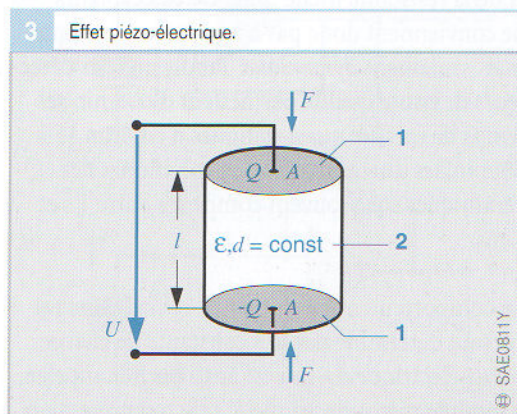


Figure 3

- 1 électrodes
- 2 corps d'épreuve piézo-électrique
- l longueur
- A maître-couple du corps d'épreuve
- F force
- Q charge
- U tension
- ε constante diélectrique
- d constante de charge piézo-électrique



Tandis que les températures de Curie des céramiques courantes sont de l'ordre de 360 °C, celles des quartz formant des tranches spéciales peuvent atteindre un seuil supérieur (440 °C). Afin d'éviter une dépolarisation en cours de fonctionnement, il convient que la température d'utilisation des céramiques et la température de Curie aient un écart substantiel. En général, cette limite se situe à environ 160 °C pour les céramiques courantes.

Outre les céramiques, des feuilles minces en plastique spécial (PVDF) présentent également des propriétés piézo-électriques. Contrairement aux matières cristallines, les matériaux piézo-électriques synthétiques, qui sont exclusivement utilisés en automobile, peuvent être fabriqués de manière très économique. En revanche, leurs caractéristiques de mesure (dérive thermique, hystérésis, tenue au vieillissement, dispersion de sensibilité, résistance interne, etc.) sont nettement moins bonnes que celles des matériaux cristallins. Presque tous les matériaux synthétiques ont un « effet pyro-électrique » très marqué et le plus souvent indésirable. De cet effet résulte aussi, en cas de variations de température, la formation de charges à la surface de ces matériaux, lesquelles se superposent aux charges générées par des forces.

Les charges générées ne restent cependant pas permanentes pendant la durée d'action des forces, mais se déchargent par la résistance externe du circuit de mesure et également par la résistance interne du capteur piézo-électrique. La constante de temps de cette décharge se calcule à partir du produit de la capacité du capteur et de la résistance totale utile. De tels capteurs ne conviennent donc pas à une mesure statique, mais seulement *dynamique*. Tandis que des détecteurs de haute qualité permettent d'obtenir des temps de mesure quasi statiques d'environ 15 à 60 min, les durées maximales spécifiques des céramiques sont souvent comprises entre 1 s et 1 ms.

Le comportement électrique de ces capteurs est surtout déterminé par la « constante de charge piézo-électrique  $d$  » qui est aussi parfois appelée « module piézo-électrique  $K$  ». Si  $\sigma$  représente la

contrainte mécanique introduite dans l'éprouvette et  $D$  le déplacement électrique qui règne dans l'éprouvette piézo-électrique, l'équation fondamentale suivante s'applique au cas le plus simple :

$$\sigma = F/A \quad (1) \quad \text{et} \quad D = d \cdot \sigma \quad (2)$$

Les constantes diélectriques

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

permettent de calculer la charge  $Q$  et la tension  $U$  aux électrodes du capteur, à savoir :

$$Q = A \cdot D = A \cdot d \cdot \sigma = d \cdot F \quad (3)$$

$$U = \frac{Q}{c} = \frac{d \cdot F}{\epsilon \cdot A} \cdot L = \frac{d}{\epsilon} \cdot \frac{L}{A} \cdot F \quad (4)$$

$$= g \cdot \frac{L}{A} \cdot F = g \cdot L \cdot \sigma$$

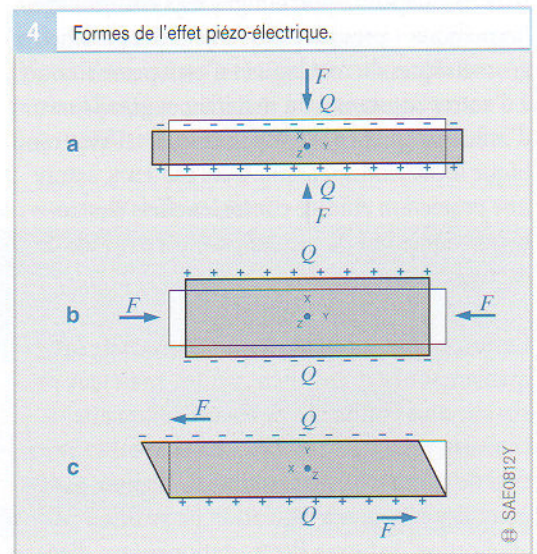
avec la constante de tension piézo-électrique

$$g = d/\epsilon \quad (5)$$

et le champ électrique dans l'éprouvette

$$E = U/L = g \cdot \sigma \quad (6)$$

**Figure 4**  
 a effet longitudinal  
 b effet transversal  
 c effet de cisaillement  
 F force  
 Q charge





Outre l'effet piézo-électrique *longitudinal* décrit précédemment et utilisé très souvent, il convient aussi de citer l'*effet transversal ou de cisaillement* (figure 4).

En fonction du matériau choisi, ces effets peuvent se manifester aussi bien individuellement que simultanément (très souvent dans la pratique). Si l'équation 2 est formulée comme tenseur, elle décrit alors globalement l'ensemble de ces effets piézo-électriques.

L'*effet transversal* des « plaquettes bimorphes », qui sont constituées de deux céramiques piézo-électriques polarisées en sens inverse, est utilisé par exemple pour la mesure des contraintes de flexion. Le cintrage de la céramique composite bicouches provoque l'allongement de l'une des moitiés ( $\epsilon > 0$ ) et la rétraction de l'autre ( $\epsilon < 0$ ). La polarisation opposée des demi-céramiques induit l'addition des tensions partielles générées  $U_1$  et  $U_2$ , d'où résulte une tension totale  $U$  qui peut être saisie sur les deux couches externes de métallisation (figure 5). En principe, aucune métallisation ne s'impose entre les deux céramiques. Les jauges bimorphes mesurent leur propre flexion. Par contre, si elles sont collées ou soudées sur une membrane métallique, elles détectent également sa déformation (p. ex. microphone).

### Traitement électrique des signaux

**Captage de la tension :** les capteurs piézo-électriques ayant une haute résistance interne, il est recommandé de placer un premier amplificateur-découpleur à proximité immédiate du capteur (si possible même dans un boîtier hermétique commun), afin de détecter sûrement la tension de sortie  $U$ . De longs câbles d'alimentation altèrent le signal à cause de leur capacité parasite (diviseur de tension) et de leur résistance effective parasite (figure 6a).

**Captage de la charge :** dans le cas d'un capteur piézo-électrique, il est préférable d'utiliser un amplificateur de charge, qui accumule la charge générée par le capteur dans un condensateur de mesure  $C_M$  de haute qualité et libère ainsi le capteur même de toute charge et tension. Ce mode de traitement permet la quasi-suppression des influences parasites issues du câble d'alimentation, ce qui fait que l'intégration de l'amplificateur au capteur ne s'impose pas vraiment (figure 6b).

### Exemples d'application

- capteurs d'accélération à effet Hall,
- capteurs d'accélération piézo-électriques (éléments de flexion bimorphes, éléments longitudinaux, tels que capteurs de cliquetis),
- capteurs d'accélération micromécaniques.

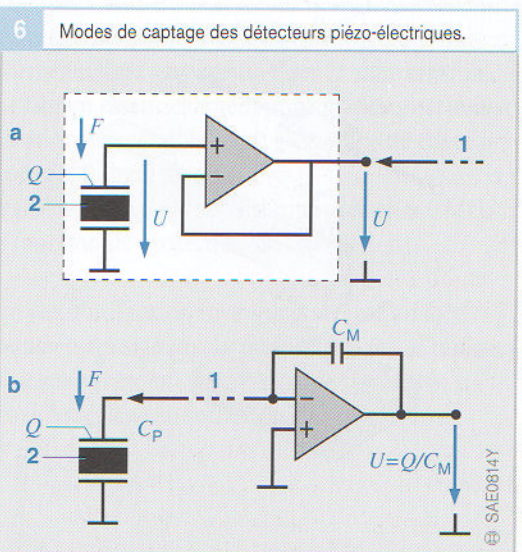
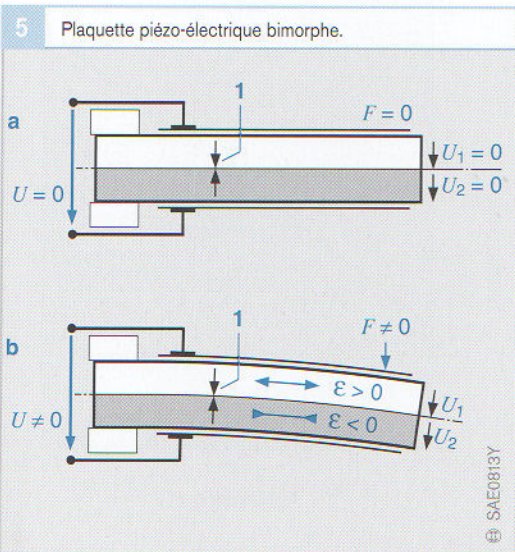


Figure 5

- a au repos
- b en cas de cintrage en haut, allongement ( $\epsilon > 0$ ) en bas, rétraction ( $\epsilon < 0$ )
- 1 sens de polarisation
- F force de mesure
- U tension totale
- $U_1, U_2$  tensions partielles

Figure 6

- a captage de la tension
- b captage de la charge
- 1 ligne d'alimentation
- 2 corps d'épreuve piézo-électrique de capacité  $C_P$
- $C_M$  capacité de mesure
- F force de mesure
- Q charge
- U tension



## Accéléromètres à effet Hall

### Applications

Les véhicules équipés du système antiblocage ABS, de la régulation antipatinage ASR, d'une transmission intégrale et du contrôle dynamique de trajectoire ESP disposent en plus des capteurs de vitesse de roue d'un accéléromètre à effet Hall permettant de mesurer les accélérations longitudinales et transversales du véhicule (en fonction de la position de montage, par rapport au sens de déplacement).

### Conception

L'accéléromètre à effet Hall utilise un système masse-ressort à fixation « élastique » (figures 1 et 2).

Il est constitué d'une lame-ressort placée de chant (3) qui est tendue à l'une de ses extrémités. Un aimant permanent (2) faisant office de masse sismique est positionné à l'extrémité libre de la lame-ressort. Le capteur à effet Hall (1) et l'électronique d'exploitation surplombent l'aimant permanent. Une plaquette d'amortissement en cuivre (4) se trouve sous l'aimant.

### Fonctionnement

Dès que le capteur est soumis à une accélération transversale au ressort, la position de repos du système masse-ressort change. Son déplacement est un paramètre spécifique de l'accélération. Le flux magnétique  $F$  résultant du mouvement de l'aimant génère une tension Hall  $U_H$  dans le capteur à effet Hall. La tension de sortie  $U_A$  qui provient de l'électronique d'exploitation augmente linéairement avec l'accélération (figure 3, plage de mesure env. 1 g).

Le capteur convient aux accélérations basse fréquence (bande passante de quelques Hz) et dispose d'un amortissement électrodynamique.

Figure 1

- a électronique
- b système masse-ressort
- 1 capteur Hall
- 2 aimant permanent
- 3 ressort

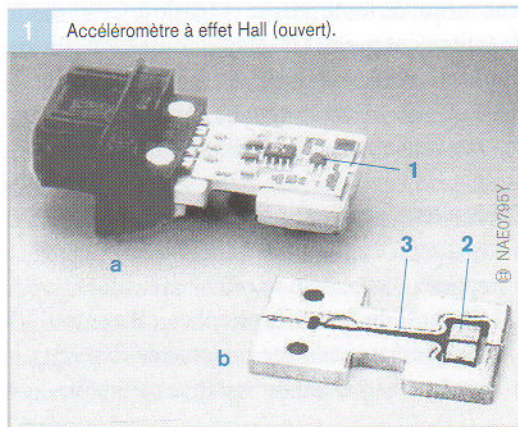
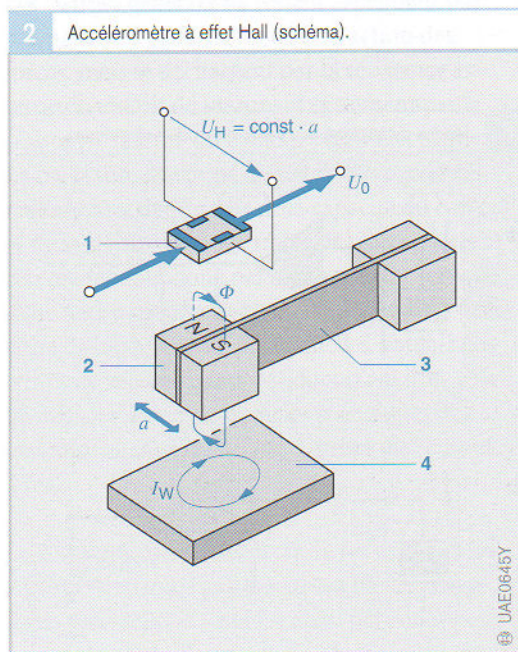
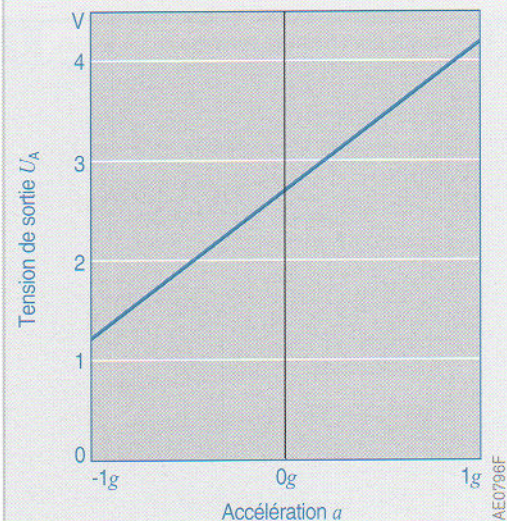


Figure 2

- 1 capteur Hall
- 2 aimant permanent
- 3 ressort
- 4 plaque d'amortissement
- $I_W$  courants de Foucault (amortissement)
- $U_H$  tension Hall
- $U_0$  tension d'alimentation
- $\phi$  flux magnétique
- $a$  accélération (transversale) enregistrée



3 Accéléromètre à effet Hall (courbe caractéristique, exemple).





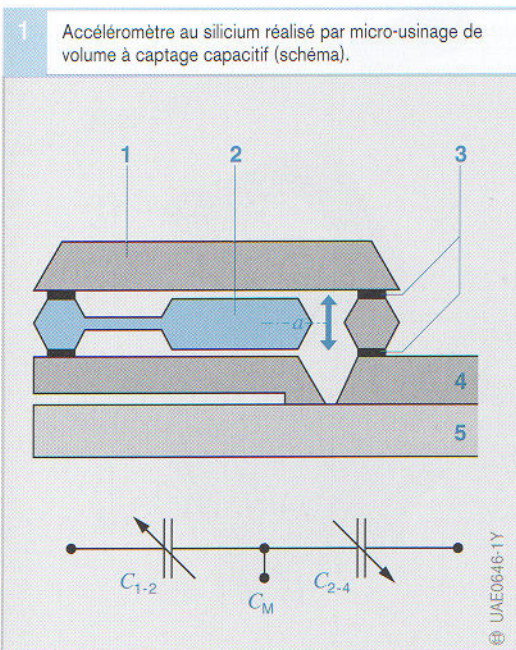
## Accéléromètres au silicium réalisés par micro-usinage de volume

### Applications

Les accéléromètres micromécaniques au silicium des systèmes de retenue des passagers détectent les valeurs d'accélération d'un choc frontal ou latéral et introduisent le déclenchement des pré-tensionneurs, des coussins gonflables et de l'arceau anticapotage.

### Conception et fonctionnement

Le système masse-ressort de ce type de capteur est usiné directement dans la tranche de silicium par gravure anisotrope et sélective (micro-usinage de volume). Une gravure supplémentaire libère les ressorts par évidement de la partie périphérique. La mesure du déplacement se fait par détection capacitive, procédé reconnu pour offrir une grande précision de mesure. Les accéléromètres de ce type comportent, de part et d'autre de la masse-ressort (figure 1, rep. 2), une plaquette de silicium ou de verre (1, 4) (de l'épaisseur d'une tranche) supportant des contre-électrodes. Les deux couches externes et les contre-électrodes de cette structure à trois couches servent également de protection contre les surcharges.



Cette disposition des plaques correspond au montage en série de deux condensateurs différentiels  $C_{1-2}$  et  $C_{2-4}$  (capacités de la structure comprises entre 10 et 20 pF). Des tensions alternatives de phases opposées, dont le recouvrement est détecté au point  $C_M$  (capacité de mesure) entre les condensateurs donc sur la plaque médiane en Si (masse sismique), sont appliquées aux bornes des condensateurs.

Sous l'action d'une accélération  $a$  dans le sens de détection, la plaque médiane en Si, qui constitue la masse sismique, se déplace. Ce mouvement entraîne une variation de l'écart par rapport aux plaques supérieure et inférieure et, par conséquent, une variation de capacité au niveau des condensateurs  $C_{1-2}$  et  $C_{2-4}$ . Il en résulte une variation du signal électrique qui est amplifié, filtré et numérisé par l'électronique d'exploitation (CMOS) puis transmis au calculateur de commande des coussins gonflables.

La charge d'air savamment dosée, contenue dans le boîtier hermétique enveloppant le système vibrant, garantit un amortissement efficace et économique, une grande compacité et une faible dérive thermique. De nos jours, les trois plaquettes de silicium sont presque toujours assemblées au moyen du procédé de soudage par refusion. Chacun des éléments ayant des coefficients de dilatation thermique différents, la précision de mesure dépend aussi beaucoup du mode de montage de l'élément actif sur le socle du boîtier. Le meilleur résultat est obtenu avec une fixation quasi linéaire en libre suspension dans la zone sensible.

Conçu essentiellement pour la mesure d'accélération assez faibles ( $< 2 g$ ), ce type de capteur comporte deux puces :

1 puce sensible + 1 puce d'interprétation CMOS à fonction de protection intégrée.

En cas d'utilisation inversée pour une analyse poussée des signaux, la masse sismique se replace automatiquement en position de repos et le signal de réglage fait office de grandeur initiale.

Figure 1

- 1 plaque supérieure en Si
- 2 plaque médiane en Si (masse sismique)
- 3 oxyde de Si
- 4 plaque inférieure en Si
- 5 substrat en verre
- $a$  accélération dans le sens de détection
- $C_M$  capacité de mesure



## Accéléromètres réalisés par micro-usinage de surface

### Applications

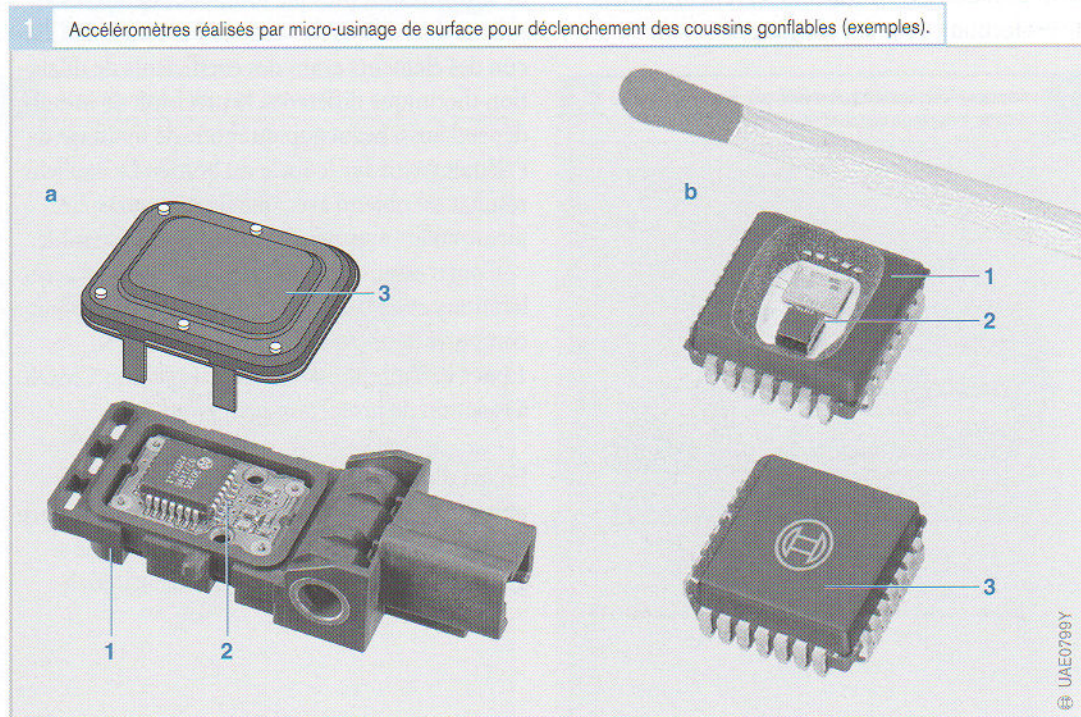
Les accéléromètres réalisés par micro-usinage de surface et destinés aux systèmes de retenue des passagers détectent les valeurs d'accélération d'un choc frontal ou latéral et introduisent le déclenchement des prétensionneurs, des coussins gonflables et de l'arceau anticapotage.

### Conception et fonctionnement

Ce type de capteurs utilisé à l'origine pour détecter les fortes accélérations (50 à 100 g) sur les systèmes de protection des passagers convient aussi à la mesure de faibles accélérations. Comparé à un capteur au silicium réalisé par micro-usinage de volume, il est beaucoup plus compact (longueur d'arête typique d'environ 100 à 500  $\mu\text{m}$ ) et son boîtier étanche intègre également l'électronique d'interprétation (ASIC) (figure 1). Son système masse-ressort est appliqué sur la surface de la tranche de silicium par un procédé additif.

La masse sismique, dont les électrodes ont la forme d'un peigne, est suspendue élastiquement dans la cellule de mesure (figures 2 et 3, rep. 1). Chacune des faces de ces électrodes mobiles comporte des électrodes fixes également en forme de peigne et solidaires de la plaquette de silicium (3, 6). Cette association d'électrodes fixes et mobiles correspond au montage en série de deux condensateurs différentiels  $C_1$  et  $C_2$  (capacité de la structure en peigne d'environ 1 pF). Des tensions alternatives de phases opposées, dont le recouvrement est détecté au point  $C_M$  (capacité de mesure) entre les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  donc sur la plaque médiane en Si (masse sismique), sont appliquées aux bornes des condensateurs.

La masse sismique étant suspendue à des ressorts (2), une accélération linéaire  $a$  dans le sens de détection entraîne une variation de l'écart entre les électrodes fixes et mobiles et, par conséquent, une variation de capacité au niveau des condensateurs  $C_1$  et  $C_2$ . Il en résulte une variation du signal électrique qui est amplifié, filtré et numérisé par l'électronique d'exploitation puis transmis au calculateur de commande des coussins gonflables. En raison de la faible capacité d'environ 1 pF,





l'électronique d'interprétation est intégrée directement au capteur sur une puce unique ou étroitement reliée à ce dernier. La réalisation de systèmes à régulation de position et remise à l'état initial est possible.

L'électronique d'interprétation dispose aussi d'une compensation des dérives du capteur et d'un autodiagnostic pendant la phase de mise en action. Dans ce cas, des forces électrostatiques induisent le déplacement de la structure en peigne et donc la simulation de la phase d'accélération du véhicule.

Des détecteurs micromécaniques « doubles » équipent par exemple les systèmes de contrôle de trajectoire ESP pour la régulation de la dynamique de roulage (figure 4). En réalité, ils sont constitués de deux capteurs indépendants. Un capteur de lacet et un accéléromètre micromécaniques forment un module compact. Cette technique permet de réduire le nombre de composants et de conducteurs de transfert des signaux. Autre avantage : il faut moins de points de fixation et d'espace de montage sur le véhicule.

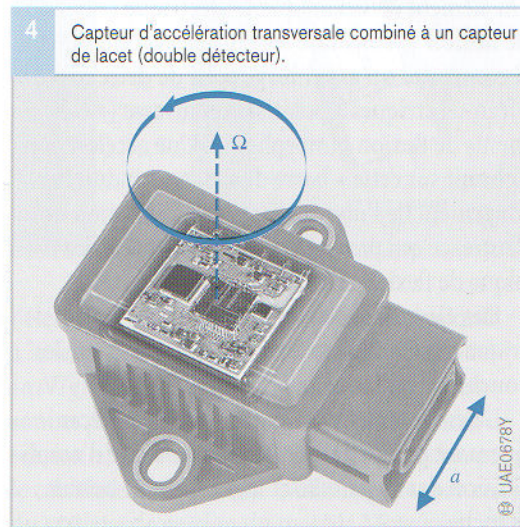
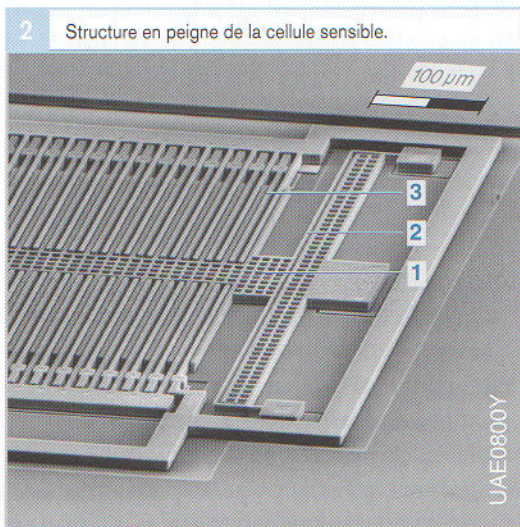


Figure 2

- 1 masse sismique à suspension élastique et électrode
- 2 ressort
- 3 électrodes fixes

Figure 4

- $a$  accélération dans le sens de détection
- $\Omega$  vitesse de lacet

3 Accéléromètre réalisé par micro-usinage de surface à captage capacitif (schéma).

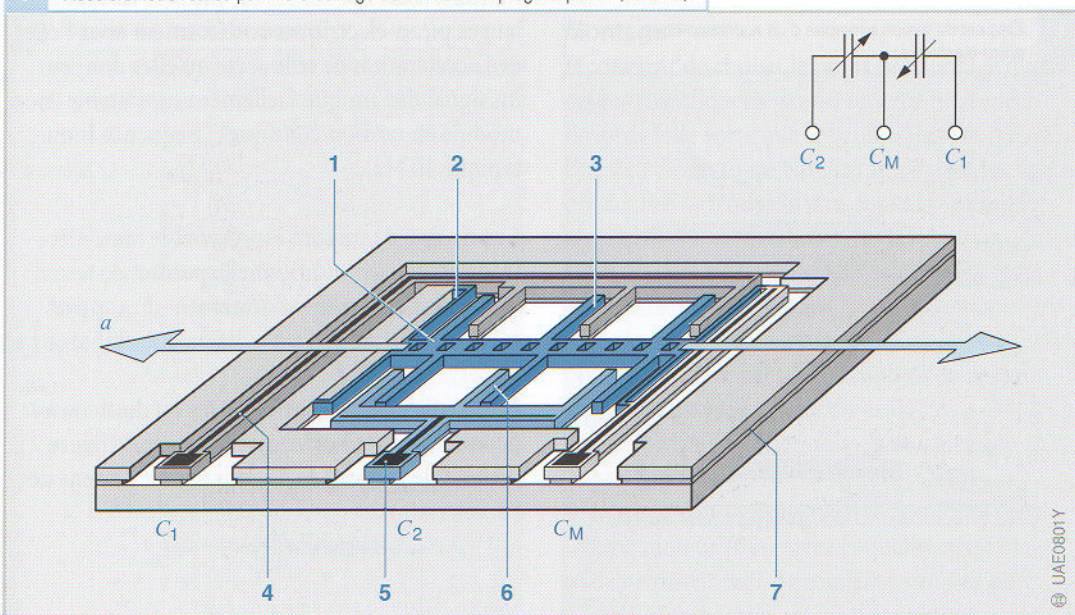


Figure 3

- 1 masse sismique à suspension élastique et électrodes
- 2 ressort
- 3 électrodes fixes de capacité  $C_1$
- 4 pistes conductrices en Al
- 5 piste de soudure anodique
- 6 électrodes fixes de capacité  $C_2$
- 7 oxyde de silicium
- $a$  accélération dans le sens de détection
- $C_M$  capacité de mesure



## Accéléromètres piézo-électriques

### Applications

Les éléments de flexion piézo-électriques bimorphes et les céramiques piézo-électriques bicouches sont utilisés comme capteurs d'accélération des systèmes de protection des passagers pour le déclenchement des prétensionneurs, des coussins gonflables et de l'arceau de capotage.

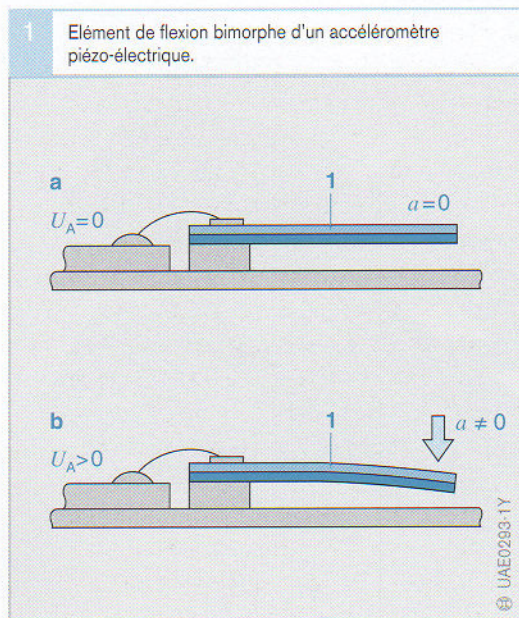
### Conception et fonctionnement

Un élément de flexion piézo-électrique (« barre de flexion ») constitue le cœur de l'accéléromètre. Il comprend un assemblage collé de deux couches piézo-électriques à polarisation inverse (« éléments de flexion bimorphes »). Une accélération agissant sur cette « barre de flexion » induit l'allongement de l'une des faces et la rétraction de l'autre, ce qui provoque une contrainte mécanique de flexion (figure 1).

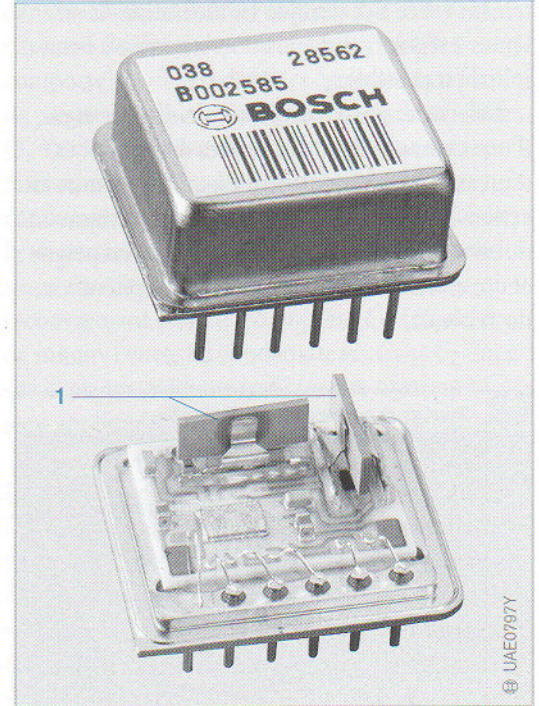
Des électrodes, où est saisie la tension électrique résultant de la flexion, se trouvent sur les couches métallisées externes.

L'élément sensible – parfois protégé mécaniquement par un gel – et le premier étage d'amplification des signaux sont logés dans un boîtier étanche.

Figure 2  
1 éléments de flexion



2 Accéléromètre piézo-électrique (aspect d'un capteur double à montage vertical).



Un circuit hybride, qui est constitué d'un convertisseur d'impulsions, d'un filtre et d'un amplificateur, est intégré à l'accéléromètre et sert au conditionnement des signaux. Il définit ainsi la sensibilité et la plage de fréquences utile. Le filtre supprime les fractions de signaux haute fréquence. En raison de leur propre masse, les jauges piézo-électriques se déforment sous l'effet de l'accélération de telle sorte qu'elles donnent un signal dynamique facilement exploitable (non modulé en tension continue) (fréquence limite typique 10 Hz).

Le principe de mesure est réversible : une électrode actuatrice additionnelle permet de tester facilement le bon fonctionnement du capteur, p. ex. dans le cadre d'un « diagnostic embarqué ».

L'utilisation de capteurs simples ou doubles, à positionnement horizontal ou vertical (figure 2), dépend de la position de montage et du sens de l'accélération.



## Capteurs de cliquetis piézo-électriques

### Applications

De par leur principe de fonctionnement, les capteurs de cliquetis sont des détecteurs de vibrations et conviennent à la détection des oscillations dues aux bruits d'impact. Un tel phénomène peut se manifester dans le moteur d'un véhicule automobile en cas de combustion incontrôlée. Il est connu sous le nom de « cliquetis ». Le capteur convertit les vibrations en signaux électriques et les transmet au calculateur électronique. En règle générale, les moteurs à quatre cylindres en ligne sont équipés d'un seul capteur de cliquetis, les moteurs à 5 ou 6 cylindres de deux capteurs, les moteurs à 8 ou 12 cylindres de deux détecteurs ou plus. Leur commutation s'effectue en fonction de l'ordre d'allumage.

### Conception et fonctionnement

En raison de son inertie, une masse exerce des forces de pression au rythme des vibrations produites sur un élément piézocéramique de forme annulaire. Ces forces provoquent un transfert de charge à l'intérieur de la céramique : une tension électrique, qui est saisie par des disques de contact et exploitée par le calculateur, prend naissance entre les faces supérieure et inférieure de

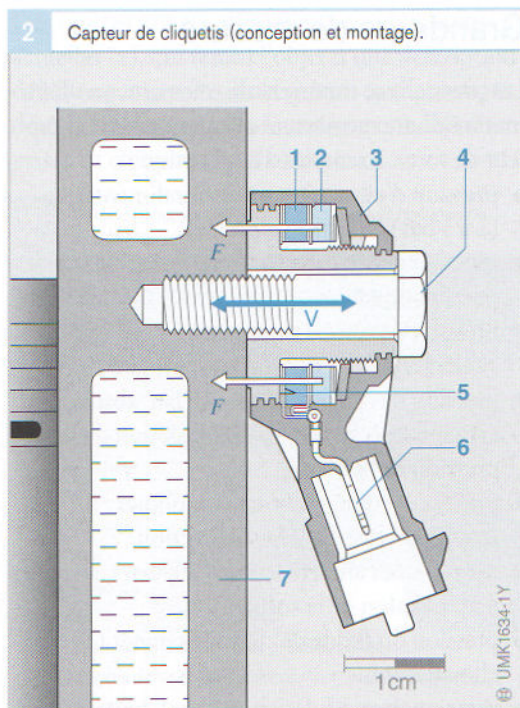


Figure 2

- 1 céramique piézo-électrique
- 2 masse sismique et forces de pression  $F$
- 3 boîtier
- 4 vis
- 5 contacts
- 6 connexion électrique
- 7 bloc moteur
- V vibration

l'élément céramique. La sensibilité correspond à la tension de sortie par unité d'accélération [mV/g]. Les tensions transmises par le capteur sont exploitables au moyen d'un amplificateur de tension alternative à haute impédance, p. ex. par le calculateur du système d'allumage ou par celui du système de gestion du moteur Motronic (figures 1 et 2).

### Montage

Il convient de choisir le point de montage d'un capteur de cliquetis sur un moteur bien spécifique de telle sorte que le bruit d'impact puisse être détecté en toute fiabilité au niveau de chaque cylindre. Il se trouve le plus souvent sur le côté large du bloc moteur. Afin que les signaux générés (vibrations dues aux bruits d'impact) puissent être transmis directement, sans résonance et en accord avec la caractéristique sélectionnée, du point de mesure sur le bloc moteur au capteur maintenu par une vis, il convient

- que la vis de fixation soit vissée au couple prédéfini,
- que la portée et le taraudage au niveau du bloc moteur présentent la qualité prescrite,
- de ne pas utiliser de rondelles simples ou élastiques pour le blocage du capteur.

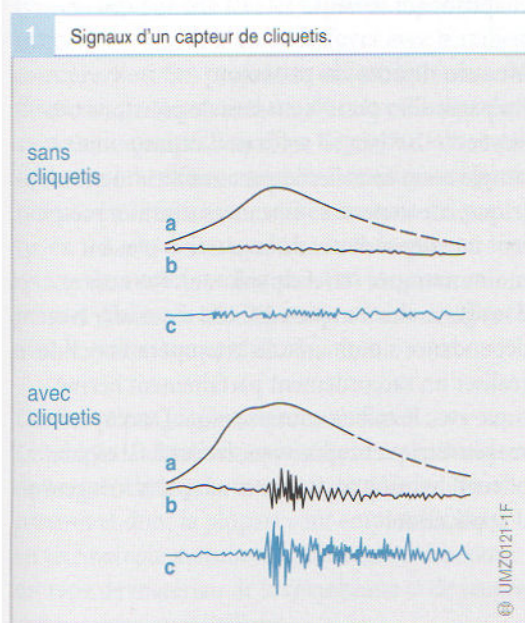


Figure 1

- a évolution de la pression dans le cylindre
- b signal de pression filtré
- c signal du capteur de cliquetis



# Capteurs de pression (manométriques)

## Grandeurs de mesure

Les pressions se mesurent directement, par déformation d'une membrane ou au moyen d'un capteur de force. Exemples d'application :

- pression d'admission ou de suralimentation (1 à 5 bar), injection d'essence,
- pression de freinage (10 bar), freins électropneumatiques,
- pression de ressort pneumatique (16 bar), véhicules à suspension pneumatique,
- pression des pneumatiques (5 bar, absolue), système de contrôle ou de régulation de la pression de gonflage,
- pression d'alimentation hydraulique (env. 200 bar), ABS, servodirection,
- pression des amortisseurs (+200 bar), systèmes de régulation de la suspension,
- pression du fluide de refroidissement (35 bar), climatiseurs,
- pression de modulation (35 bar), boîte de vitesses automatique,
- pression de freinage dans le maître-cylindre et les cylindres de frein de roue (200 bar) compensation automatique du couple de lacet, frein à commande électronique,
- surpression/dépression dans le réservoir de carburant (0,5 bar), diagnostic embarqué,
- pression dans la chambre de combustion (100 bar, dynamique), détection des ratés d'allumage et du cliquetis,

- pression dans un élément de pompe d'injection diesel (1000 bar, dynamique), régulation électronique diesel,
- pression du carburant des systèmes « Common Rail » diesel (1500 ou 1800 bar),
- pression du carburant des systèmes « Common Rail » essence (100 bar).

## Principes de mesure

Le paramètre « pression » se manifeste dans les gaz et les liquides comme effet de force non directif, c.-à-d. agissant dans toutes les directions. Il se propage bien non seulement dans les fluides, mais aussi dans les substances gélatineuses et dans les masses composites molles, propriété qui est exploitée pour des applications bien précises. La mesure des pressions s'effectue au moyen de capteurs dynamiques ou statiques.

Parmi les capteurs de pression à effet *dynamique*, il convient de citer tous les types de microphones qui, insensibles aux pressions statiques, ne servent qu'à la mesure des ondes de pression en milieux gazeux ou liquides.

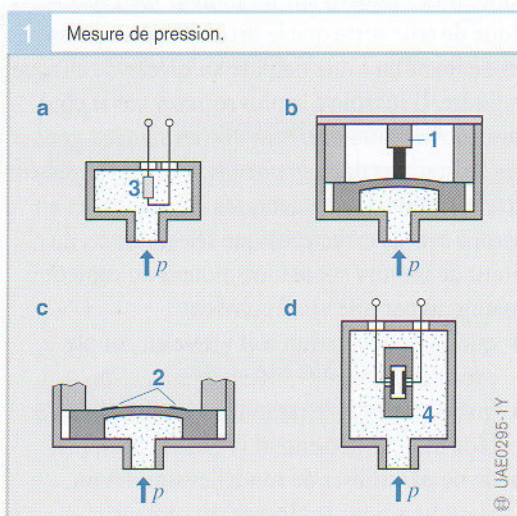
Les applications automobiles actuelles ne faisant toutefois appel qu'à des capteurs de pression *statiques*, seul ce type sera décrit en détail aux chapitres qui suivent.

### Mesure directe de pression

En particulier pour la mesure de pressions très élevées ( $>10^4$  bar), il suffirait d'exposer une simple résistance électrique au milieu manométrique, car toutes les résistances connues présentent une dépendance de la pression plus ou moins marquée (effet de volume). Par contre, il est généralement plus difficile d'annuler leur dépendance simultanée de la température et de réaliser un raccordement parfaitement hermétique avec le milieu sous pression. Des capsules manométriques capacitatives, faciles à fabriquer, offrent des propriétés mieux adaptées à ce genre d'application.

Figure 1

- a mesure directe, résistance dépendant de la pression (3)
- b mesure par capteur de force (1)
- c mesure par déformation d'une membrane/jauges extensométriques (2)
- d mesure capacitive par déformation d'une capsule-membrane





### Capteurs à membrane

La méthode de détection des pressions la plus courante (également en automobile) utilise pour le captage des signaux un étage mécanique intermédiaire constitué d'une membrane fine, dont l'une des faces est soumise à la pression à mesurer et se déforme plus ou moins sous son action. Le diamètre et l'épaisseur de cette membrane peuvent être adaptés aux différentes plages de pression. De basses pressions imposent l'utilisation de grandes membranes, dont la déformation peut atteindre une limite de 1 à 0,1 mm. Par contre, les hautes pressions nécessitent l'emploi de membranes plus épaisses et de faible diamètre, qui ne se déforment en général que de quelques  $\mu\text{m}$ . Si la méthode de mesure des basses pressions fait appel essentiellement au mode de détection d'un écartement (p. ex. capacitif), les moyennes et hautes pressions sont détectées au moyen de procédés à mesure de la tension exclusivement basés sur la technologie des jauges extensométriques.

#### Détection capacitive

Contrairement à leur application comme détecteurs inertiels (voir « Accéléromètres et capteurs de lacet »), les capteurs de pression capacitifs sont étonnamment peu répandus, bien qu'ils peuvent souvent offrir des avantages identiques (surtout au niveau de la précision). Il semble que cela soit dû à une différence essentielle avec le premier type de capteur cité ici : les capteurs manométriques nécessitent le contact direct avec le milieu sous pression. Ses propriétés diélectriques influencent pratiquement toujours le calibrage des capteurs capacitifs, lequel ne dépendrait donc pas seulement du milieu considéré, mais qui ne pourrait pas être réalisé sans milieu manométrique (p. ex. « à sec »). Dans ce cas, seule la mise en œuvre de moyens techniques très importants permet d'obtenir une séparation fiable et efficace avec le milieu sous pression.

#### Détection par jauges extensométriques

Le tableau 1 donne un synoptique des techniques de mesure de la pression, qui ont déjà fait leurs preuves et dont la plupart sont employées aussi en technologie automobile, classées en fonction du type de matériau de la membrane et de jauges extensométriques utilisées.

Des repères ont été affectés aux combinaisons actuelles (x), qui feront l'objet d'une description détaillée par la suite, ainsi qu'aux configurations dont la fabrication et la fourniture ont déjà été prises en compte (zones bleues).

1 Détection par jauges extensométriques et matériau de membrane.			
Détection par jauges	Matériau de membrane		
	Céramique	Métal (acier)	Silicium
Films <sup>1)</sup> (collés)			
Couche épaisse			
Couche mince métallique		X	
Couche mince en silicium		X	
Résistances de diffusion			X

<sup>1)</sup> mal adaptés à la fabrication en grandes séries,

(X) exemples actuels  configuration prise en compte

Tableau 1

Les différentes technologies à jauges extensométriques mentionnées ici présentent des propriétés très diversifiées quant au type et à l'importance de leur effet de mesure. Le « facteur  $K$  » (facteur de jauge) caractérise la valeur de l'effet de mesure des jauges extensométriques. Il indique le rapport entre la variation relative de résistance  $R$  et le taux de déformation rapporté à la longueur  $l$  (équation 1) :

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2 \cdot \nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$$

où le symbole  $\varepsilon$  (allongement) remplace aussi souvent le rapport  $\Delta l/l$  et représente un multiple de  $10^{-6}$  (ppm) exprimé en « micron » ou « micro strain ».

$\nu$  est le « coefficient de contraction transversale » du matériau et  $\rho$  représente sa conductivité électrique.  $\nu$  caractérise la réduction de la section du matériau à l'allongement et atteint, dans le cas idéalisé du volume maintenu constant,  $\nu = 0,5$  ( $\nu$  réel = 0,3 à 0,4).



Le terme de conductivité de l'équation 1 ne joue pratiquement aucun rôle dans le cas des résistances métalliques, mais s'avère par contre essentiel lorsqu'il s'agit de résistances en Si.

Par ailleurs, il est question d'un facteur  $K$  longitudinal lorsque l'allongement de la résistance s'effectue dans le sens du courant, et d'un facteur  $K$  transversal lorsque la résistance se dilate perpendiculairement au sens du courant (figure 2). Le tableau 2 donne un aperçu des valeurs typiques des principaux facteurs  $K$ .

Le phénomène de « fluage » très souvent redouté (faible fléchissement mécanique sous longue charge permanente unidirectionnelle) n'apparaît que dans les cas extrêmes et uniquement sur les films extensométriques collés. Toutes les autres technologies à jauges de contrainte, qui n'utilisent aucun procédé de collage, ne sont pas touchées par ce phénomène.

En réalité, l'incurvation d'une membrane ne dépend que de la différence de pression qui agit sur sa face supérieure et sa face inférieure. Par conséquent, les capteurs manométriques se subdivisent en quatre types de base différents (tableau 3), à savoir pour :

- pression absolue,
- pression de référence,
- pression barométrique,
- pression différentielle.

### Couplage aux capteurs de force

Certains capteurs n'utilisent toutefois pas directement la membrane pour la conversion du signal, mais transmettent simplement la force agissant sur la membrane à un capteur de force dont l'étendue de mesure reste constante, car l'adaptation à la plage de mesure de pression a déjà été réalisée par la membrane purement mécanique. A cet effet, il convient toutefois de maîtriser parfaitement le mode de liaison du capteur de force (p. ex. à l'aide d'un poussoir) à la membrane de détection.

### Exemples d'application

- capteurs de pression à couches épaisses,
- capteurs de pression micromécaniques,
- capteurs de pression de combustion en silicium,
- capteurs haute pression à membrane métallique.

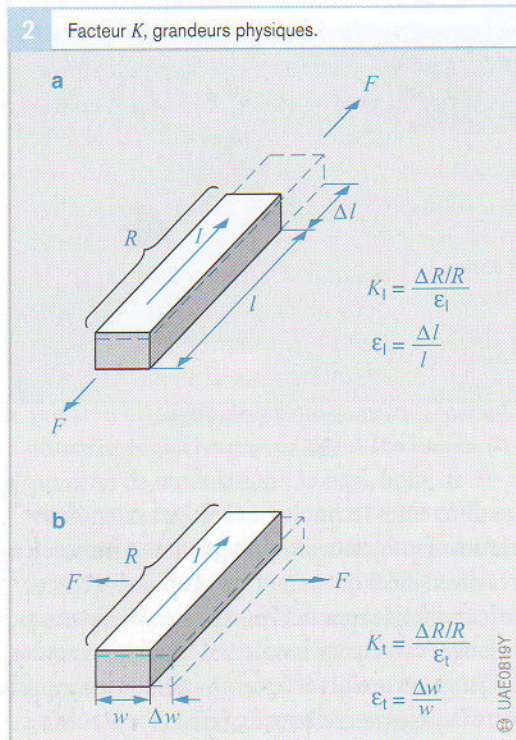


Figure 2

- a longitudinal  
b transversal  
 $F$  force  
 $I$  courant  
 $R$  résistance  
 $l$  longueur  
 $w$  largeur  
 $\varepsilon$  allongement  
 $K$  facteur de jauge

2 Facteurs  $K$  de divers matériaux.

Matériau	Facteurs $K$	
	longitudinal	transversal
Film extensométrique	1,6 ... 2,0	≈ 0
Couche épaisse	12 ... 15	12 ... 15
Couche mince métallique	1,4 ... 2,0	-0,5 ... 0
Couche mince en Si	25 ... 40	-25 ... -40
Monocristal de Si	100 ... 150	-100 ... -150

Tableau 2

3 Types de capteurs manométriques de base.

Pression sur dessous membrane $p_0$	Pression sur dessus membrane		
	Pression de mesure $p_0$	Pression ambiante	Vide
Pression de mesure	Pression différentielle	Pression de référence	Pression absolue
Pression ambiante	Pression de référence	-	Pression barométrique
Vide	Pression absolue	Pression barométrique	-

Tableau 3



## Capteurs de pression à couches épaisses

### Applications

Ce type de capteurs est intégré, en alternative aux capteurs micromécaniques, au calculateur électronique (p. ex. des systèmes de gestion du moteur M- et ME-Motronic) ou utilisé comme composant indépendant. Ses applications sont les suivantes :

- capteur de pression d'admission ou de suralimentation (plage de pressions allant de 20 à 400 kPa ou 0,2 à 4,0 bar),
- capteur de pression ambiante (plage de pressions allant de 60 à 115 kPa ou 0,6 à 1,15 bar).

### Conception et fonctionnement

Le capteur est divisé en une cellule de mesure de pression et en un compartiment renfermant le circuit d'évaluation. Ces deux éléments sont montés sur un substrat en céramique commun (figure 1).

La cellule de mesure (figure 2) consiste en une membrane à couches épaisses en « forme de cloche » qui emprisonne une pression de référence de 0,1 bar. L'incurvation de la membrane varie en fonction du niveau de pression à mesurer. Quatre jauges piézorésistives formant un pont sont disposées sur la membrane. Deux jauges actives, dont la conductivité varie sous l'effet d'une contrainte mécanique (pression à mesurer), se trouvent au centre de la membrane. Deux jauges piézorésistives de référence se trouvent sur le bord de la membrane. Elles servent en premier lieu de résistances complémentaires pour la compensation thermique et ne participent quasiment pas à la génération du signal de sortie.

Le déplacement de la membrane sous l'effet d'une pression provoque une variation de l'équilibrage du pont. La tension de mesure  $U_M$  du pont constitue donc un paramètre spécifique de la pression de mesure  $p$  (figure 3). Le circuit d'évaluation amplifie la tension du pont, compense les effets de la température et linéarise la caractéristique de pression. La tension de sortie  $U_A$  du circuit d'évaluation est transmise au calculateur.

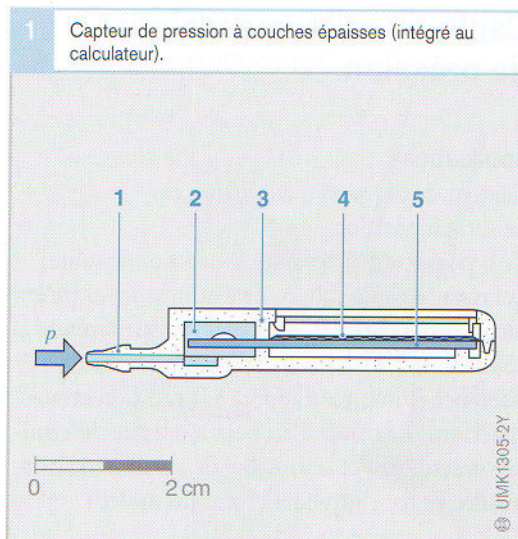


Figure 1

Zone de mesure :

- 1 raccord de pression de mesure  $p$
- 2 cellule manométrique
- 3 entretoise d'étanchéité

Conditionnement des signaux :

- 4 circuit d'évaluation
- 5 circuit hybride à couches épaisses sur substrat en céramique

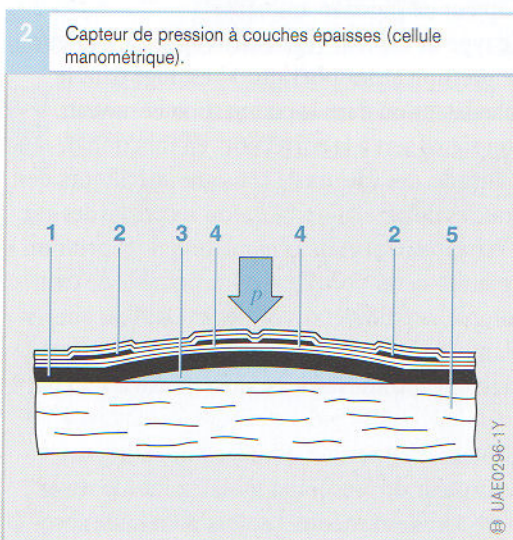


Figure 2

- 1 membrane à couches épaisses
  - 2 jauge extensométrique passive de référence
  - 3 bulle manométrique de référence
  - 4 jauge extensométrique active
  - 5 substrat en céramique
- $p$  pression de mesure

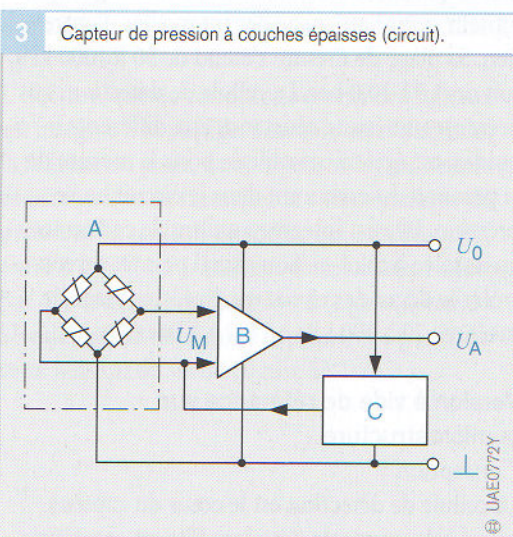


Figure 3

- A cellule manométrique à jauges extensométriques
- B amplificateur
- C circuit de compensation de température

- $U_0$  tension d'alimentation
- $U_M$  tension de mesure
- $U_A$  tension de sortie



## Capteurs micromécaniques de pression

Figure 1

- 1 membrane
- 2 pastille de silicium
- 3 vide de référence
- 4 verre (pyrex)
- 5 circuit en pont
- $p$  pression de mesure
- $U_0$  tension d'alimentation
- $U_M$  tension de mesure
- $R_1$  jauge extensométrique (rétraction)
- $R_2$  jauge extensométrique (allongement)

### Applications

#### Capteur de pression d'admission ou de suralimentation

Ce type de capteur mesure la pression absolue, qui règne dans le collecteur d'admission entre le turbocompresseur et le moteur (valeur typique 250 kPa ou 2,5 bar), par rapport à un vide de référence et non par rapport à la pression atmosphérique. La masse d'air peut alors être déterminée exactement et la pression de suralimentation réglée en fonction des besoins du moteur.

#### Capteur de pression ambiante

Ce type de capteur (également appelé « capteur de pression atmosphérique ») est logé dans le calculateur ou dans le compartiment moteur. Son signal sert à la correction, en fonction de l'altitude, des valeurs de consigne spécifiques des boucles de régulation, p. ex. du recyclage des gaz d'échappement et de la régulation de la pression de suralimentation. Il est donc possible de tenir compte des différences de densité de l'air ambiant. Le capteur de pression ambiante mesure la pression absolue (60 à 115 kPa ou 0,6 à 1,15 bar).

#### Capteurs de pression d'huile et de carburant

Le capteur de pression d'huile est monté sur le filtre à huile et mesure la pression d'huile absolue, ce qui permet de déterminer la charge du moteur pour l'affichage des intervalles d'entretien. Sa plage de mesure s'étend de 50 à 1000 kPa, soit de 0,5 à 10,0 bar. La cellule de détection, qui présente une haute résistance aux différents liquides, est également utilisée pour la mesure de la pression du carburant dans le circuit basse pression. Elle est intégrée au filtre de carburant ou accolée à celui-ci. Son signal permet de contrôler le degré de colmatage du filtre (plage de mesure : 20 à 400 kPa ou 0,2 à 4 bar).

#### Version à vide de référence sur la microstructure

##### Conception

La cellule de détection est le cœur du capteur micromécanique de pression. Elle est constituée

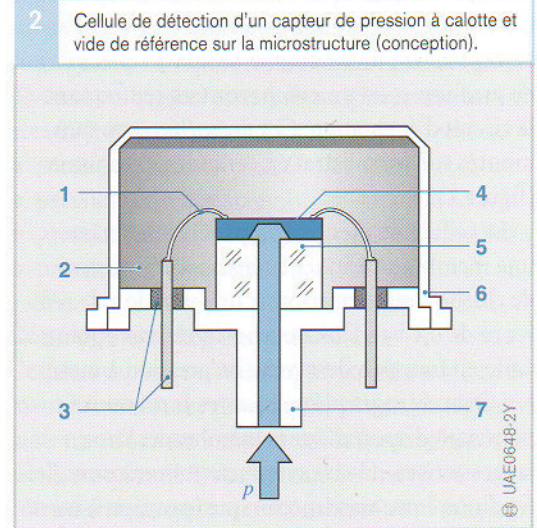
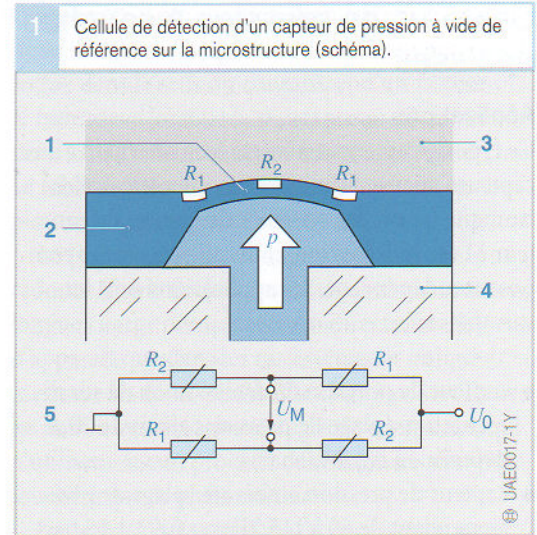


Figure 2

- 1, 3 connexions électriques à enrobage de verre
- 2 vide de référence
- 4 cellule de détection (puce) avec électronique d'exploitation
- 5 socle de verre
- 6 calotte
- 7 entrée de la pression de mesure  $p$



d'une pastille de silicium (figure 1, rep. 2) où est gravée une fine membrane réalisée en micromécanique (1). Quatre jauges piézorésistives ( $R_1$ ,  $R_2$ ), dont la résistance électrique varie en fonction de la contrainte mécanique, sont disposées sur la membrane. Une calotte, qui abrite le vide de référence, entoure la microstructure de la cellule de détection et assure son étanchéité (figures 2 et 3). Un capteur de température, dont les signaux sont exploitables de façon indépendante, peut également être logé sous le boîtier du capteur de pression (figure 4, rep. 1). La mesure de la température et de la pression s'effectue donc en un seul point par un capteur bi-fonction.

#### Fonctionnement

La membrane de la cellule de détection subit une déformation (10 à 1000  $\mu\text{m}$ ) dont l'amplitude dépend de la valeur de la pression de mesure. La résistance électrique des quatre jauges piézorésistives déposées sur la membrane varie sous l'effet de la contrainte mécanique qui lui est appliquée.

Les résistances de mesure sont disposées sur la pastille de silicium de façon à ce que la déformation de la membrane se traduise par une augmentation de la résistance électrique de deux des jauges et par une diminution de cette grandeur des deux autres jauges piézorésistives. Les résistances de mesure forment un pont de Wheatstone (figure 1, rep. 5). La variation des résistances entraîne également une variation du rapport des tensions électriques au niveau des jauges de mesure. La tension de mesure  $U_M$  varie donc également. Cette tension de mesure, qui n'est pas encore amplifiée, constitue donc un paramètre exprimant la pression sur la membrane.

Le montage en pont permet d'obtenir une tension de mesure supérieure à celle qui serait réalisable avec une seule résistance. Le pont de Wheatstone permet donc d'améliorer la sensibilité de la cellule de détection.

La face structurale de la membrane, qui n'est pas exposée à la pression, est soumise à un vide de référence (figure 2, rep. 2) de sorte que le capteur mesure la valeur absolue de la pression.

4 Capteur de pression micromécanique à vide de référence sur la microstructure (conception).

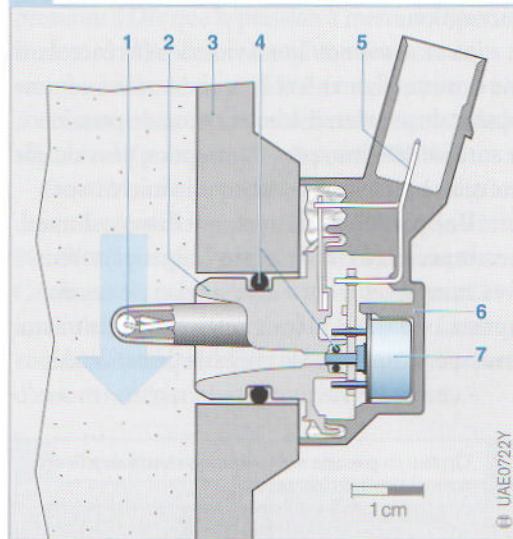
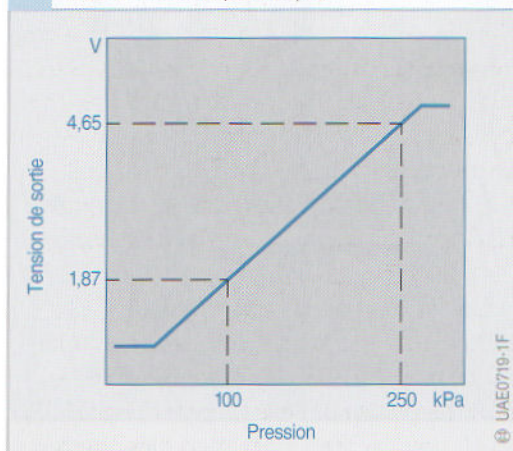


Figure 4

- 1 capteur de température (CTN)
- 2 partie inférieure du boîtier
- 3 paroi du collecteur d'admission
- 4 joints
- 5 connexion électrique (fiche)
- 6 couvercle du boîtier
- 7 cellule de détection

5 Capteur micromécanique de pression de suralimentation (courbe caractéristique, exemple).



L'électronique de conditionnement des signaux est intégrée à la pastille. Son rôle est d'amplifier la tension du pont, de compenser les influences thermiques et de linéariser la caractéristique de pression. La tension de sortie, qui est comprise entre 0 et 5 V, est transmise au calculateur moteur par des connexions électriques (figure 4, rep. 5). Le calculateur détermine la pression à partir de cette tension de sortie (figure 5).



### Version à vide de référence dans une caverne

#### Conception

Le capteur manométrique à vide de référence dans une caverne (figures 6 et 7), qui est utilisé comme capteur de pression d'admission ou de pression de suralimentation, est de conception plus simple que celui à vide de référence sur la microstructure. Une pastille de silicium, qui dispose d'une membrane gravée et de quatre jauges piézorésistives montées en pont – comme dans le cas du capteur à calotte et vide de référence sur la microstructure – constitue la cellule de détection dépo-

sée sur un socle de verre. Contrairement à la version décrite précédemment, le socle de verre ne présente pas de trou par lequel la pression de mesure agit sur la face arrière de la cellule de détection. La pastille de silicium est cependant soumise à la pression sur la face où se trouve l'électronique d'exploitation. Cette face doit donc être protégée par un gel spécial contre les influences de l'environnement (figure 8, rep. 1). Le vide de référence se trouve dans la cavité (caverne) créée entre la pastille de silicium (6) et le socle de verre (3). La totalité de l'élément de mesure repose sur un hybride en céramique (4) qui dispose de pistes de brasage pour la réalisation d'autres points de contact.

Un capteur de température peut également être logé sous le boîtier du capteur de pression. Il plonge directement dans le flux d'air et réagit ainsi très rapidement aux variations de température (figure 6, rep. 4).

#### Fonctionnement

Les modes de fonctionnement, de traitement et d'amplification des signaux ainsi que la caractéristique de ce type de capteur correspondent à ceux de la version à calotte et vide de référence sur la microstructure. La seule différence consiste en la déformation de la membrane de la cellule de détection et, par conséquent, des jauges piézorésistives dans le sens opposé.

Figure 6

- 1 paroi du collecteur d'admission
- 2 boîtier
- 3 joint
- 4 capteur de température (CTN)
- 5 connexion électrique (fiche)
- 6 couvercle du boîtier
- 7 cellule de détection

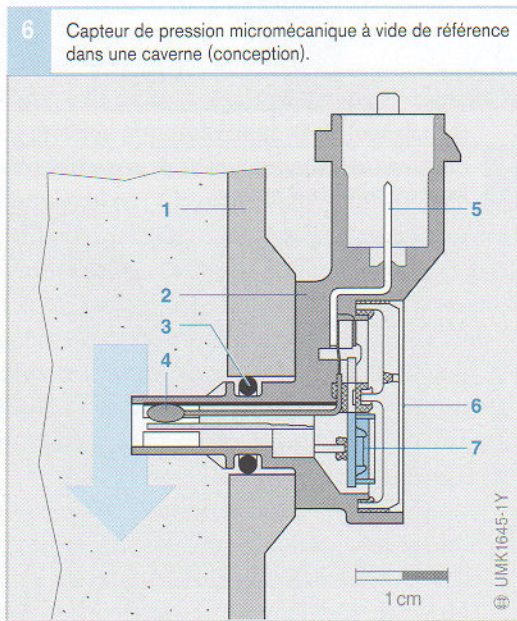
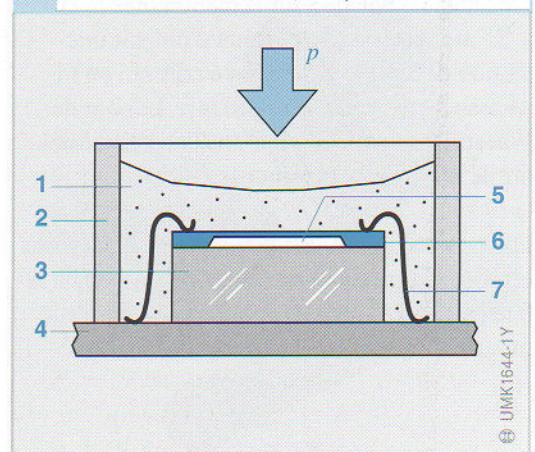


Figure 8

- 1 gel de protection
- 2 enveloppe pour gel
- 3 socle de verre
- 4 hybride céramique
- 5 caverne à vide de référence
- 6 cellule de détection (puce) avec électronique d'exploitation
- 7 liaison soudée
- $p$  pression de mesure



8 Cellule de détection d'un capteur de pression à vide de référence dans une caverne (conception).





## Capteurs haute pression

### Applications

Ce type de capteurs est utilisé en automobile pour la mesure de la pression du carburant et du liquide de freins.

#### Capteur manométrique de « rail » diesel

Le capteur manométrique, affecté au système « Common Rail », mesure la pression du carburant dans l'accumulateur haute pression, le « rail ». La pression de travail maximale  $p_{\max}$  (pression nominale) est de l'ordre de 160 MPa (1600 bar). La pression du carburant est modulée par un circuit de régulation. Elle est quasiment constante et indépendante de la charge et de la vitesse de rotation. Les écarts éventuels par rapport à la consigne sont compensés par un modulateur ou régulateur de pression.

#### Capteur manométrique de « rail » essence

Le capteur manométrique, affecté au système « MED-Motronic » à injection directe d'essence, mesure la pression du carburant dans la rampe distributrice, le « rail ». La pression, qui dépend de la charge et de la vitesse de rotation, est de l'ordre de 5 à 12 MPa (50 à 120 bar). La pression mesurée est prise en compte comme grandeur réelle par le circuit de régulation de la pression « rail ». La valeur de consigne, qui dépend de la charge et du régime, est mémorisée dans une cartographie. Un modulateur de pression assure sa régulation au niveau du « rail ».

#### Capteur de pression du liquide de freins

Ce capteur haute pression mesure la pression du liquide de freins dans le groupe hydraulique des systèmes de sécurité au roulage (p. ex. ESP) ; elle est en général de 25 MPa (250 bar). Les valeurs de pression maximales  $p_{\max}$  peuvent atteindre 35 MPa (350 bar). La mesure et le contrôle de la pression sont déclenchés par le calculateur qui effectue aussi leur évaluation à partir d'un rétro-signal.

### Conception et fonctionnement

Une membrane d'acier, dont les jauges piézorésistives métallisées sous vide forment un circuit en pont, constitue le cœur du capteur (figure 1, rep. 3). La plage de mesure du capteur dépend de l'épais-

seur de la membrane (membrane épaisse pour les pressions élevées, membrane fine pour les faibles pressions). Dès que la pression à mesurer traverse le raccord (4) et s'exerce sur l'une des faces de la membrane, la valeur de la résistance des jauges piézorésistives varie en raison de la déformation de la membrane (p. ex. env. 20  $\mu\text{m}$  pour 1500 bar).

Des câbles de jonction transmettent la tension de sortie générée par le pont, de l'ordre de 0 à 80 mV, au circuit d'exploitation (2) du capteur. Ce circuit amplifie le signal émis par le pont à une valeur comprise entre 0 et 5 V et le transmet au calculateur qui définit alors la pression à partir d'une caractéristique mémorisée (figure 2).

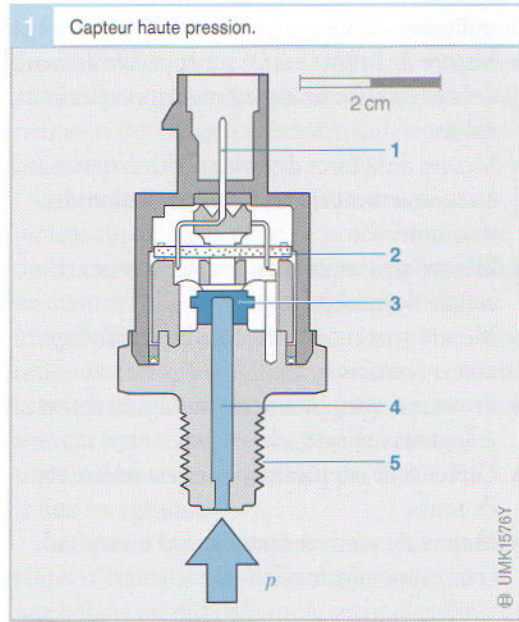
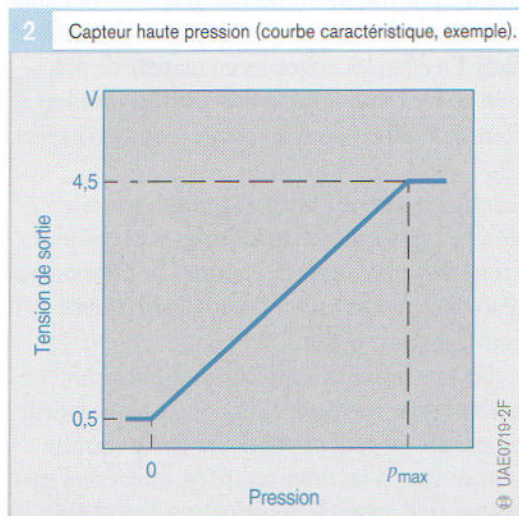


Figure 1

- 1 connexion électrique (fiche)
- 2 circuit d'exploitation
- 3 membrane en acier et jauges extensométriques
- 4 raccord de pression
- 5 filetage de fixation





## Capteurs de force/couple

### Grands de mesure

Comme le montre l'énumération suivante, les applications automobiles des capteurs de force et de couple sont très diversifiées.

- Mesure de la force d'accouplement entre véhicule tracteur et attelage/remorque pour un freinage régulé et sans effort sur les véhicules utilitaires.
- Mesure de la force s'exerçant sur les amortisseurs pour la régulation électronique de la suspension.
- Mesure de la charge d'essieu pour la répartition de la force de freinage sur les véhicules utilitaires.
- Mesure de l'effort exercé sur la pédale de frein des systèmes de freinage à régulation électronique.
- Mesure de la force de freinage des systèmes à actionnement électrique et régulation électronique.
- Mesure sans contact du couple moteur et du couple de freinage.
- Mesure sans contact du couple de braquage, avec ou sans assistance.
- Protection antipincement pour les lève-vitres et les toits ouvrants électriques.
- Capteurs de couple intégrés aux roulements de roues.
- Mesure du poids des passagers d'un véhicule (pour systèmes de retenue).

Jusqu'à présent, les nombreux projets de développement n'ont toujours pas atteint les objectifs fixés. En effet, les exigences en matière de précision ne sont toujours pas compatibles avec les coûts prévisibles pour les applications envisagées.

Contrairement aux attentes générales, la fabrication de capteurs de couple fiables n'est pas plus économique que celle de capteurs de pression ou d'accéléromètres par exemple. C'est l'inverse qu'il convient de constater.

Un inconvénient supplémentaire se manifeste surtout pour les capteurs de couple : la grandeur de mesure ne peut pas toujours être transmise sans contact d'un *arbre rotatif* (p. ex. arbre d'entraînement, arbre de direction, etc.) au châssis.

Les capteurs de force et de couple doivent être placés directement dans le *flux énergétique* (c.-à-d. transmettre la totalité de la grandeur de mesure), car n'importe quel mode de détection de composantes de force dérivées est très problématique et facilement altérable. Les capteurs de mesure d'une force sont donc de type extensif, c.-à-d. que leur dimensionnement dépend directement de l'étendue de mesure.

Certes, des conceptions compactes, qui conviennent aux applications automobiles, sont déjà commercialisées. Elles ne donnent toutefois un résultat précis que si des forces bien définies sont transmises au capteur, ce qui n'arrive normalement qu'au cours d'études en laboratoire. Les tolérances et gauchissements inévitables dans la pratique imposent en général l'insertion de longs *éléments mécaniques d'homogénéisation* qui rendent l'encombrement des capteurs bien souvent inadmissible.

Au cas où des composants transmettant une force ou un couple doivent être coupés en vue du montage de capteurs précontrôlables, il en résulte en général un *problème d'interface* qui doit être résolu par coopération étroite entre le fabricant de capteurs, les fournisseurs (souvent différents) de la pièce réadaptée et le constructeur automobile. Jusqu'à présent, ce genre de problème ne s'est jamais manifesté avec une telle netteté et portée pour les autres types de capteurs.

Même si le flux énergétique n'est pas coupé, mais est remplacé par des liaisons mécaniques sous forme de « ressorts de mesure » et modifiées uniquement en vue de la fixation d'éléments sensibles, il convient de procéder à une adaptation très précise.



## Principes de mesure

La mesure des forces implique de faire une distinction entre, d'une part, les principes statiques ou dynamiques et, d'autre part, ceux qui détectent un déplacement ou une tension.

Jusqu'à présent, il a été surtout fait appel à des capteurs statiques. Dans le cas des capteurs de force, la préférence a été donnée aux principes de mesure rigide d'une contrainte. Uniquement au niveau des capteurs de couple et dans le cas actuel du captage du couple de braquage, l'utilisation de systèmes de détection flexibles, qui peuvent également mesurer une position angulaire, semble se généraliser. Cela s'avère possible car cette caractéristique a déjà pu être exploitée autrefois sur les systèmes hydrauliques sans détecteur. A l'heure actuelle, l'utilisation de bobinages (à effet magnétique) domine toujours au niveau des capteurs de force et de couple, car l'application d'éléments microstructurés n'est pas encore clairement définie pour une fabrication en grandes séries.

### Capteurs de force

#### Principe magnétostrictif

L'effet magnétostrictif (ou magnéto-élastique) repose sur le comportement anisotrope (dépendant de la direction considérée) de la perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  (rapport entre l'induction et le champ magnétiques). Si ce paramètre présente toujours la même valeur dans toutes les directions en l'absence de force, il prend dans le sens d'application de la force une valeur différente ( $\mu_{rl}$ ) de celle qui apparaît dans le sens transversal ( $\mu_{rq}$ ) (figure 1).

La variation de perméabilité dans le sens de la force reflète même le signe de cette force. Bien que presque tous les matériaux ferromagnétiques présentent cet effet, son optimisation est possible par composition bien définie des alliages. Toutefois, les matériaux, qui ont une faible hystérésis, une bonne linéarité et une faible dérive thermique, ne sont pas simultanément ceux qui offrent le meilleur effet de mesure. Si les plus importants effets observés sont de l'ordre de 30% (rapportés à la valeur de base isotrope) et exploitables sans assistance électronique, l'effet des matériaux techniquement optimisés n'atteint plus

que quelques pour cent en fonctionnement et impose donc une amplification électronique.

Les avantages de l'effet magnétostrictif résultent, d'une part, de sa large plage thermique et de son utilisation jusqu'à des températures d'environ 300 °C. D'autre part, il s'agit d'un véritable effet de volume, c.-à-d. que les bobines détectrices ne captent pas uniquement une variation de perméabilité due à la transmission d'une force locale, mais la totalité de l'effet magnétostrictif agissant sur toute la section du bobinage. Le capteur est donc moins sensible à une éventuelle application asymétrique de la force.

Les variations de perméabilité en fonction de la force étant pratiquement toujours détectées au moyen de champs à courant alternatif, il convient aussi de prendre en compte la profondeur de pénétration des champs alternatifs qui dépendent beaucoup de la fréquence :

Seules les contraintes mécaniques, qui se déploient aussi dans la plage de pénétration active du champ de mesure, peuvent participer à l'effet de mesure. Afin de pouvoir exploiter au maximum l'effet de mesure, l'entrefer magnétique utile doit être aussi petit que possible. A cet effet, la boucle de mesure magnétiquement active est souvent fermée par un matériau ferromagnétique, même si ce dernier n'est pas inclus dans le flux énergétique.

La figure 2 montre les deux principales possibilités d'évaluation de l'effet magnétostrictif : si une bobine est disposée sur le corps d'épreuve de telle sorte que son sens de champ coïncide avec la direction de la force, la variation détectable de

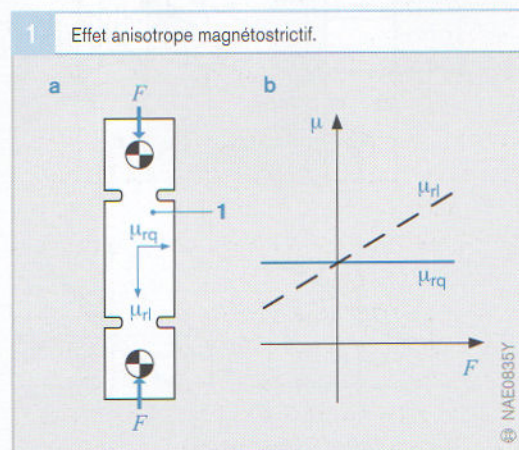


Figure 1

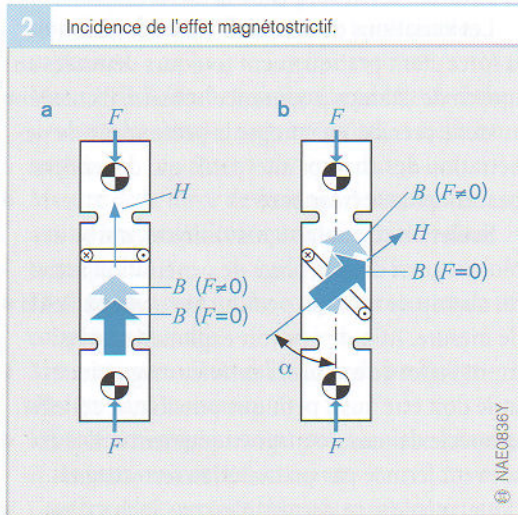
- a corps d'épreuve magnétostrictif
- b effet de mesure
- $F$  force
- $\mu_r$  perméabilité magnétique relative
- $\mu_{rq}$  perpendiculaire au sens d'application de la force
- $\mu_{rl}$  dans le sens d'application de la force



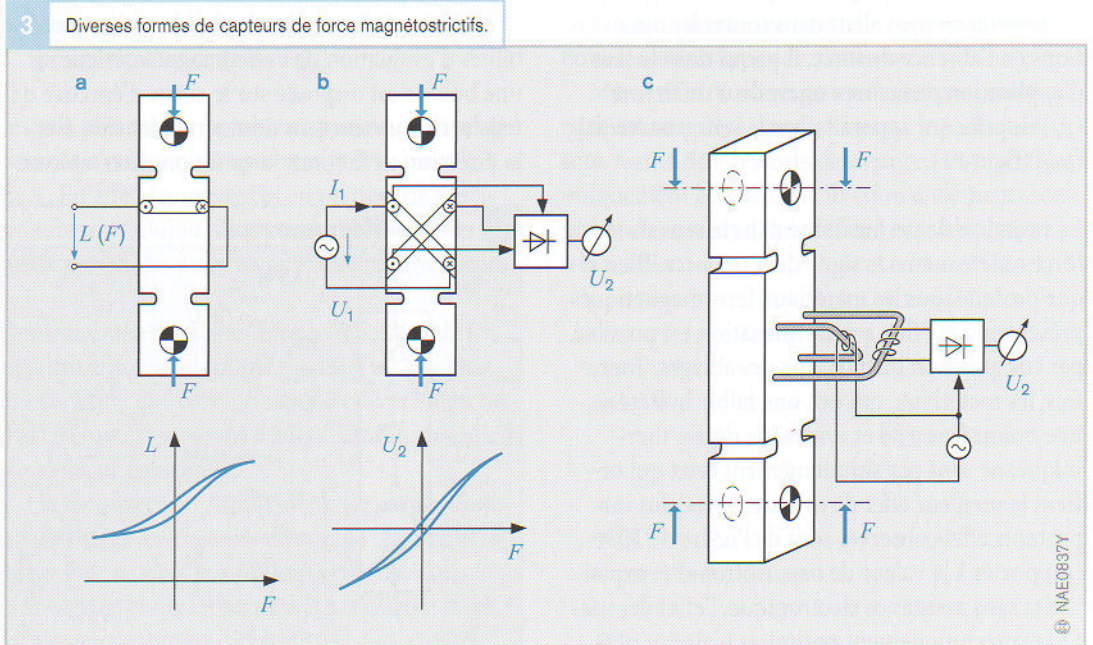
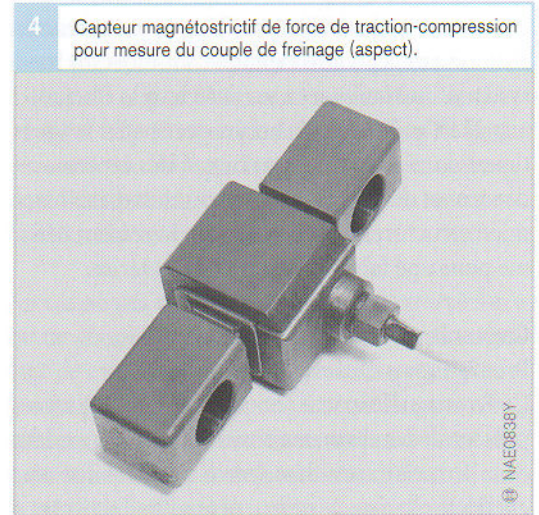
l'inductance  $L$  peut alors être exploitée. Le champ  $H$  et l'induction  $B$  générés ont toujours le même sens, indépendamment de l'importance de l'effet de la force (figures 2a et 3a).

Lorsque le champ  $H$  d'une bobine d'alimentation ne se trouve pas en parallèle à l'axe du sens d'application de la force, non seulement la valeur de l'induction magnétique  $B$  varie sous l'effet de la force, mais également sa direction (du fait de l'anisotropie de la perméabilité) (figure 2b).

Si, en l'absence de force, les sens des grandeurs  $H$  et  $B$  se superposent normalement, leurs directions diffèrent cependant de plus en plus lorsque l'effet de force augmente. Ce phénomène peut être avantageusement exploité pour la variation du couplage magnétique de deux bobines servant à la mesure (figures 3b, c et 4).



**Figure 2**  
 a le sens de la force est parallèle au champ  
 b le sens du champ  $H$  diffère de celui de la force  $F$   
 $B$  induction  
 $\alpha$  angle de déport



**Figure 3**  
 a inductance variable  
 b couplage variable : noyau en croix  
 c couplage variable : noyau en portail

© NAE0836Y

© NAE0837Y



Principe à jauges extensométriques (piézorésistives)

L'utilisation de jauges extensométriques est la méthode la plus courante, la plus fiable et la plus précise pour la mesure des forces et des couples (figure 5). Elle repose sur le fait qu'il existe un rapport proportionnel entre les contraintes mécaniques  $\sigma$  – dues à l'application d'une force – et l'allongement  $\varepsilon$  dans la zone du matériau du corps d'épreuve soumis à la loi de Hook. Selon cette loi, il convient donc de poser l'équation suivante :

$$\varepsilon = \Delta l/l = \sigma/E$$

où la constante de proportionnalité  $E$  est connue sous le terme de « module E ». En réalité, le principe à jauges extensométriques est une méthode de mesure indirecte, car elle ne détermine pas directement les contraintes dues aux forces, mais les déformations qui en résultent. Par exemple, si le « module E » diminue de 3% à 100 K, comme cela se passe pour les métaux, le niveau de force atteint par les jauges extensométriques est alors de 3% trop élevé. Les jauges extensométriques, qui constituent des résistances à couches, sont solidaires de la surface du corps d'épreuve de telle sorte qu'elles adoptent sans altération son élongation superficielle. La variation de résistance, qui

résulte de l'allongement de la jauge piézorésistive, est définie par le facteur de jauge  $K$  spécifique de la résistance (voir « Capteurs de pression ») :

$$\Delta R/R = K \cdot \varepsilon$$

En général, le facteur  $K$  des résistances à couches métalliques ne dépasse pas l'indice 2. Les jauges extensométriques sont réalisées (en liaison avec un matériau à dilatation thermique bien défini) de manière à ne présenter si possible aucune propre dérive thermique ( $TK_R \approx 0$ ). Les restes d'une dérive thermique sont éliminés sous l'action d'un montage en demi-pont ou en pont complet intégré au corps d'épreuve. Les influences de la température agissant également sur les jauges (contrairement à l'allongement de mesure), elles ne génèrent aucun signal de sortie.

Les différentes résistances complémentaires du pont peuvent être placées (mais ce n'est pas obligatoire) dans la zone d'élongation du corps de mesure ; en tant que résistances purement passives, elles peuvent également n'avoir qu'une simple fonction de compensation (figure 5c). Il faut également tenir compte du fait que le facteur  $K$  présente souvent une dérive en température ( $TK_K$ ). En général, il diminue lorsque la température augmente, c.-à-d. qu'il peut être éventuellement compensé, dans les cas les plus favo-

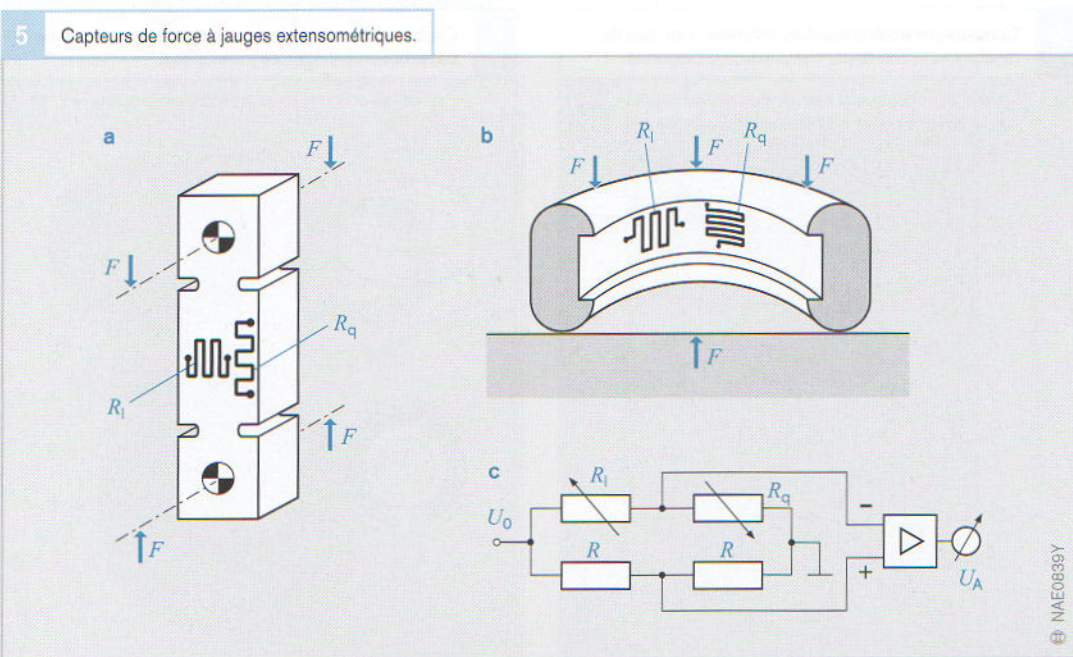


Figure 5  
 a en forme de barreau  
 b en forme d'anneau  
 c évaluation électronique  
 $F$  force  
 $R_{1,q}$  résistances à couches métalliques, longitudinales, transversales  
 $R$  résistances complémentaires du pont  
 $U_0$  tension d'alimentation  
 $U_A$  tension de sortie



rables, par l'amplification du signal provoquée par le module E.

Autrement, toute diminution du signal causée par le facteur  $K$  est généralement compensée par augmentation adéquate de la tension d'alimentation du pont.

#### Inconvénients/restrictions

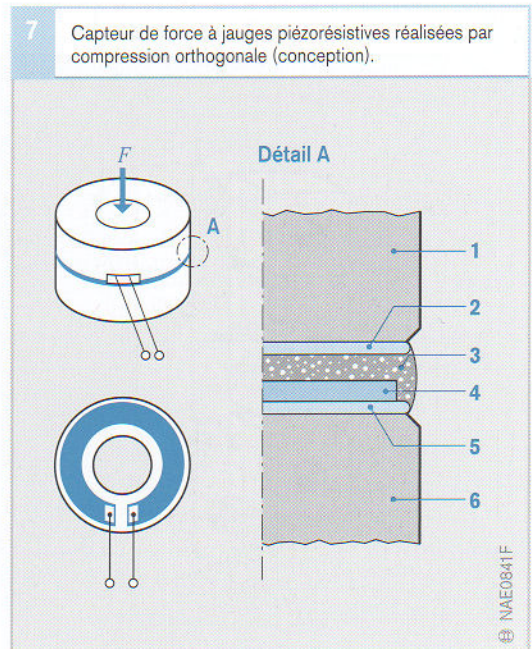
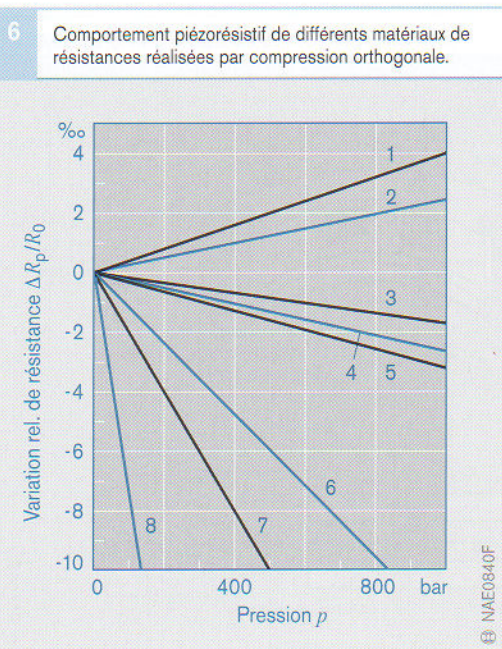
Malgré leur grande précision et fiabilité, les capteurs à jauges extensométriques ne génèrent que de faibles signaux de sortie (mV), car les allongements et donc les variations de résistance n'atteignent que la plage du pour mille (du moins pour les jauges à couches métalliques). En général, ils imposent une fonction d'amplification locale. Un autre inconvénient des capteurs à jauges extensométriques de petites dimensions réside dans le fait qu'ils ne mesurent avec précision que les contraintes mécaniques qui apparaissent à leur point de montage. Un moyennage sur un corps d'épreuve relativement long n'a pas lieu (si ce n'est que par une structure de jauges réparties en surface). Cette technique impose une transmission très précise et reproductible de la force, afin d'éviter les erreurs de mesure résultant d'une inégalité d'application de la force.

#### Applications

En règle générale, la mesure des forces suppose le montage de jauges extensométriques de petites dimensions sur des corps d'épreuve d'assez grande taille et propageant les forces. La technique conventionnelle, qui consiste au collage des jauges au moyen d'un film-support (procédé employé pour les appareils courants, tels que balances précises, etc.) ne s'avère toutefois pas assez économique pour une fabrication à faibles coûts en grandes séries. Par contre, des essais d'intégration au corps d'épreuve de plaquettes ou de rondelles métalliques, sur lesquelles les jauges extensométriques ont été déposées économiquement et avec un haut rendement sous forme de couches, sont actuellement en cours. Ces tentatives mettent également en œuvre des techniques d'insertion et de soudage.

#### Résistances réalisées par compression orthogonale

La valeur de résistance de quasiment toutes les résistances électriques à couches ne varie pas uniquement sous l'effet de contraintes de tension latérales, qui agissent dans le plan des couches, mais également sous l'effet d'une compression verticale (orthogonale) par rapport au plan des couches. Le matériau « plastique conducteur » déjà connu par son utilisation sur les potenti-





mètres présente une sensibilité maximale. Le « cermet » et les « couches de carbone » donnent aussi un bon effet de mesure (figure 6). La résistance des matériaux précités diminue jusqu'à un certain seuil limite au fur et à mesure que la force de compression augmente. Les valeurs obtenues sans variation durable de la résistance sont semblables à celles induites par un allongement latéral. En général, la limitation résulte de la rigidité du substrat et non du matériau constituant la résistance. De par leur nature, les capteurs de ce type ne répondent presque uniquement qu'à la compression et non à la traction.

La plupart des matériaux présentent toutefois aussi une dérive thermique relativement importante en fonction de leur coefficient d'allongement, si bien qu'il est difficile d'utiliser ce genre de capteurs pour des mesures statiques. La réalisation de circuits en pont prévoit de réserver sur le substrat des surfaces non soumises aux forces de compression, sur lesquelles il est possible de déposer des résistances complémentaires, non exposées à la compression, ou des résistances compensatrices asservies à la température.

La réalisation de rondelles dynamométriques suppose la superposition des résistances de mesure à un substrat robuste, en acier par exemple. Un disque de transfert de force rend ces résistances solidaires les unes des autres (par collage ou vitrification, figures 7 et 8).

Les résistances sensibles à la compression peuvent également être déposées sur un film-support (figure 9) qui peut ainsi être placé dans un espace restreint entre les éléments transmetteurs d'énergie (p. ex. intégration aux sièges d'un véhicule). De tels films résistifs ne constituent certes pas des capteurs de force très précis, mais conviennent toutefois très bien à la réalisation de structures multicapteurs (« réseaux de capteurs ») qui permettent de détecter des répartitions de forces superficielles ou les contours d'un objet soumis à une masse. Certains de ces systèmes capteurs font appel à des matériaux qui présentent un effet de mesure bien plus poussé et une courbe caractéristique à évolution quasiment exponentielle. Le film flexible remplit aussi souvent la fonction annexe d'un contacteur électrique qui ne se ferme que sous l'action d'une force et active alors la résistance de mesure. Il n'existe pas encore de procédés d'encapsulation des films résistifs qui soient parfaitement étanches à l'humidité, ce qui se concrétise généralement par une réduction de la stabilité longue durée de ce type de capteurs.

#### Exemples d'application des capteurs de force

- capteur d'axe d'attelage magnétorésistif,
- capteur de force de freinage à magnétostriction,
- capteur intégré à l'assise de siège (poids des passagers).

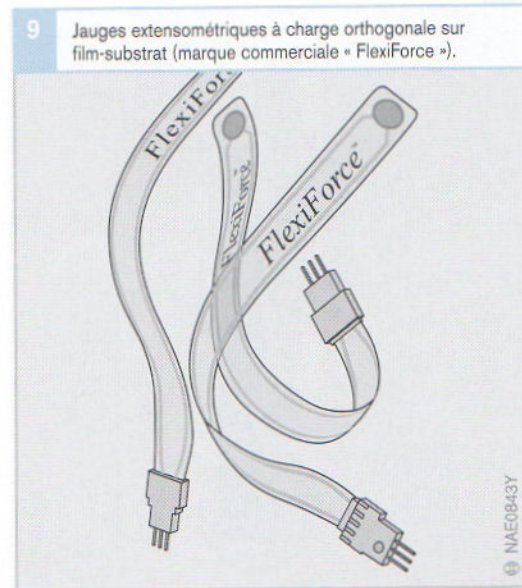
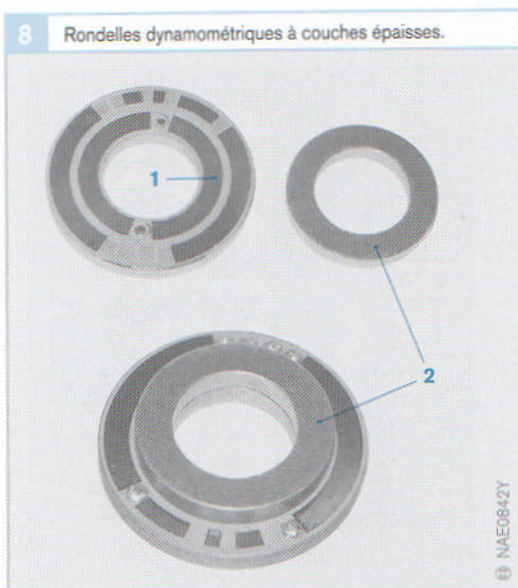


Figure 8

- 1 jauges extensométriques à charge orthogonale
- 2 disque de transfert de force en verre surmoulé



### Capteurs de couple

On distingue deux familles de capteurs de couple : les couplemètres à mesure de tension et les couplemètres à mesure d'angle de torsion. A la différence des couplemètres à mesure de tension (le plus souvent à jauges extensométriques ou à magnétostriction), les couplemètres à mesure d'angle de torsion (p. ex. à courants de Foucault) requièrent pour la mesure (angles de torsion  $\Phi$  compris entre  $0,4$  et  $4^\circ$ ) un barreau (corps d'épreuve) d'une certaine longueur  $l$ . La tension mécanique  $\sigma$  proportionnelle au couple fait un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe du barreau (figure 10).

Les différents principes décrits par la suite conviennent également à la transmission sans contact de valeurs de mesure générées par des arbres en rotation. Dans le cas de la mesure du couple de braquage, la tendance actuelle suppose l'utilisation simultanée du procédé de mesure (par intégration modulaire) pour la détection exacte de l'angle de braquage (sur un tour complet de  $360^\circ$ ), tout en acceptant une légère extension des moyens à mettre en œuvre.

### Couplemètres à mesure de tension

Les capteurs magnétostrictifs (inducteurs annulaires) enveloppant un axe sont certes déjà connus, mais nécessitent une technologie complexe

et coûteuse. L'optimisation du matériau de l'arbre ne tenant pas toujours compte de l'aspect magnéto-élastique, différents procédés sont étudiés pour recouvrir d'une couche magnétostrictive la surface de l'arbre de mesure. Jusqu'à présent, il n'a pas été possible de trouver un revêtement offrant aussi une bonne qualité de mesure. Le principe à jauges extensométriques s'est donc pratiquement imposé dans ce contexte technologique (figure 11).

La tension mécanique est mesurée au moyen d'un pont de jauges extensométriques alimenté par un transformateur rotatif. Une électronique de redressement et de régulation placée sur le corps d'épreuve rend l'alimentation indépendante de l'entrefer. D'autres composants électroniques, qui sont également disposés sur le corps d'épreuve, amplifient le signal de mesure et le convertissent en une forme de courant alternatif insensible aux variations d'entrefer (p. ex. en un signal modulé en fréquence) avant de le transmettre à un circuit externe via un second transformateur rotatif. Pour la fabrication en grandes séries, l'ensemble de l'électronique est regroupé sur un seul et unique C.I. qui est solidaire du corps d'épreuve. Les jauges extensométriques sont généralement appliquées sur un flan d'acier circulaire préfabriqué (p. ex. en couches minces) qui est ensuite soudé sur le corps d'épreuve. Ce

10 Principe de base d'un couplemètre à mesure d'angle de torsion.

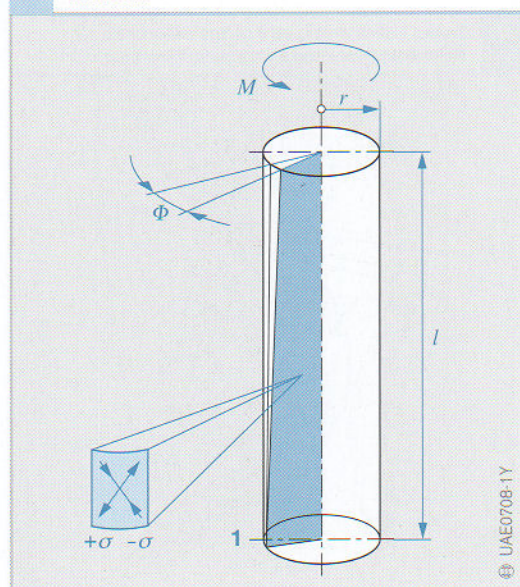


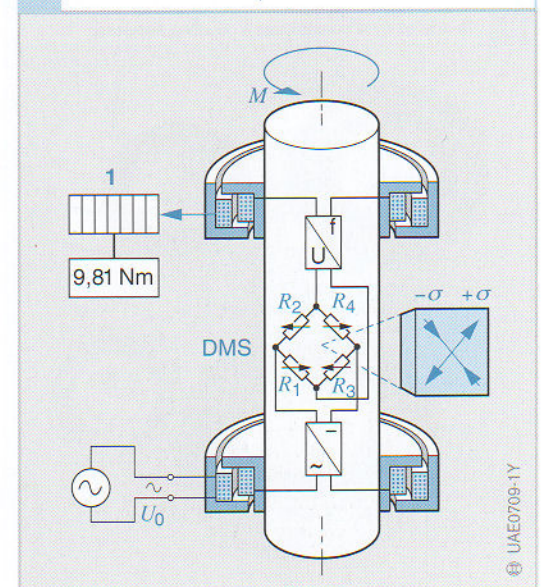
Figure 10

- 1 cylindre
- $\Phi$  angle de torsion
- $\sigma$  tension de torsion
- $M$  couple
- $r$  rayon
- $l$  longueur du cylindre

Figure 11

- 1 afficheur de couple
- $\sigma$  tension de torsion
- $M$  couple
- $U_0$  tension d'alimentation
- $R_1 \dots R_4$  jauges piézorésistives

11 Couplemètre à jauges extensométriques (DMS) et détection sans contact par transformateurs rotatifs.



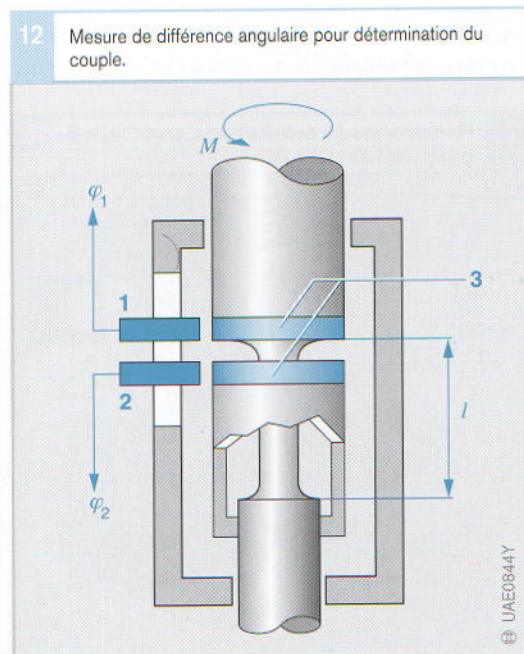


procédé de fabrication permet d'obtenir une précision élevée à faibles coûts.

### Couplemètres à mesure d'angle de torsion

*Couplemètres à détection d'une différence angulaire*  
L'angle de torsion peut être déterminé de manière relativement simple et facile par montage à chaque extrémité d'un corps de torsion (d'une longueur d'environ 5 à 10 cm) solidaire de l'arbre d'un capteur tachymétrique incrémentiel ou d'un capteur de position angulaire à mesure absolue, analogique ou numérique, sans contact (figure 12). Leur différence d'affichage  $\varphi_2 - \varphi_1$  représente un paramètre de l'angle de torsion. Jusqu'à présent, cette méthode s'est révélée trop complexe, car l'obtention d'une précision suffisante impose des points d'appui extrêmement stables ainsi qu'un pas incrémentiel ou angulaire très exact sur l'ensemble de la périphérie. Une solution (magnétique, optique) à ces problèmes est toujours à l'étude, car elle permettrait d'obtenir deux avantages essentiels :

- Possibilité de mesure simultanée de l'angle de rotation au moyen du même système.
- Possibilité de procéder à une légère modification de l'arbre de torsion pour réaliser un capteur « enfichable » et d'obtenir ainsi une interface pratique pour l'adaptation d'un composant provenant d'un autre équipementier.



### Couplemètre à courants de Foucault

Le cylindre est entouré sur une grande partie de sa longueur de deux manchons concentriques, emboîtés l'un dans l'autre et fixés chacun d'un côté du cylindre par bridage (figure 13). Chaque manchon possède deux rangées de fentes disposées de telle manière, qu'en cas de torsion, l'une des rangées découvre le cylindre de plus en plus et l'autre de moins en moins.

Ce masquage/démasquage plus ou moins important du cylindre a pour effet de modifier l'inductance des deux bobines haute fréquence (env. 1 MHz) fixes placées sur le corps extérieur, à la hauteur des fentes. La précision de mesure dépend beaucoup de la précision de fabrication et de montage des manchons à fentes. L'électronique de traitement des signaux est placée à proximité des bobines.

### Exemples d'application des couplemètres

- couplemètre à mesure de tension, à jauges extensométriques,
- couplemètre à mesure d'angle de torsion, à courants de Foucault (outillage électroportatif).

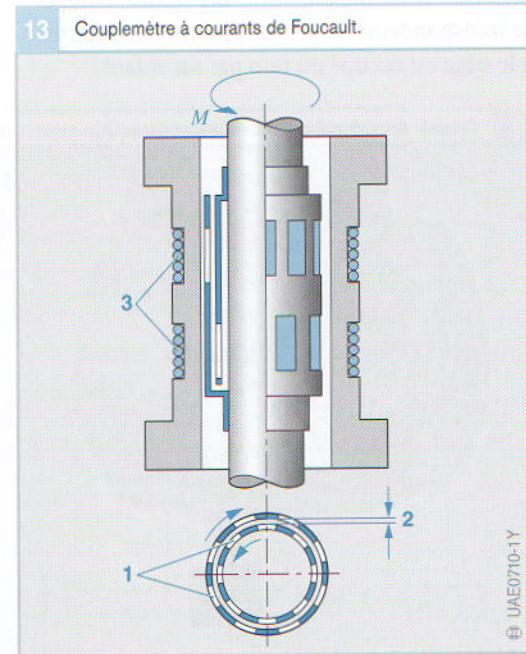


Figure 12

- 1, 2 capteurs de position angulaire/de vitesse de rotation
- 3 repères de position angulaire
- $l$  distance de torsion
- $M$  couple à mesurer
- $\varphi_{1,2}$  signaux de position angulaire

Figure 13

- 1 manchons à fentes
- 2 entrefer
- 3 bobines haute fréquence
- $M$  couple à mesurer



## Classification des passagers/ détection de sièges enfant

### Fonction

A la suite de l'introduction du coussin gonflable côté passager, des motifs techniques de sécurité et d'assurances ont rendu nécessaire la détection d'occupation ou non du siège passager par une personne. Si le siège passager n'est pas occupé en cas d'un accident éventuel et qu'une fonction de protection ne s'impose donc pas, l'activation inopinée du coussin gonflable pourrait entraîner des frais inutiles de remise en état.

La mise au point de coussins gonflables « intelligents » exige parallèlement la détection d'occupation des sièges conducteur et passager. Adapté à la personne considérée et à la situation momentanée, le coussin « intelligent » doit moduler son degré de gonflement. Le déclenchement et déploiement du coussin doivent être évités lorsqu'ils risquent de poser un problème aux passagers dans des circonstances bien précises (p. ex. si un enfant est assis sur le siège passager ou si un siège enfant s'y trouve). Le mode de détection « simple » d'occupation des sièges a donc été perfectionné afin de réaliser un système « intelligent » de classification des passagers OC (Occupant Classification). L'intégration de capteurs supplémentaires permet la détection automatique des sièges enfant. Equipé de transpondeurs, ce système permet de détecter si le siège est occupé ou non par un enfant.

### Conception

Des coussins détecteurs insérés aux sièges avant du véhicule et équipés de calculateurs (figures 1 et 2) captent des informations sur les occupants et les transmettent au calculateur de commande des coussins gonflables. Ces données sont alors prises en compte pour le déclenchement adéquat des systèmes de retenue des passagers.

### Fonctionnement

#### Principe de mesure

Le principe de mesure repose sur la classification de personnes en fonction de leur physiologie (poids, taille, etc.) afin de permettre le déclenchement optimisé des coussins gonflables. La mesure directe du poids du passager est remplacée par le système OC qui exploite en priorité la relation entre les propriétés anthropométriques<sup>1)</sup> (p. ex. la distance entre les os iliaques) et le poids. A cet effet, le coussin détecteur OC mesure le profil de pression sur l'assise du siège. L'évaluation montre si le siège est occupé ou non. L'analyse suivante permet d'affecter la personne en question à une catégorie bien définie (figure 3).

<sup>1)</sup> Anthropométrie : étude des proportions du corps humain et technique de mensuration de ses diverses parties.

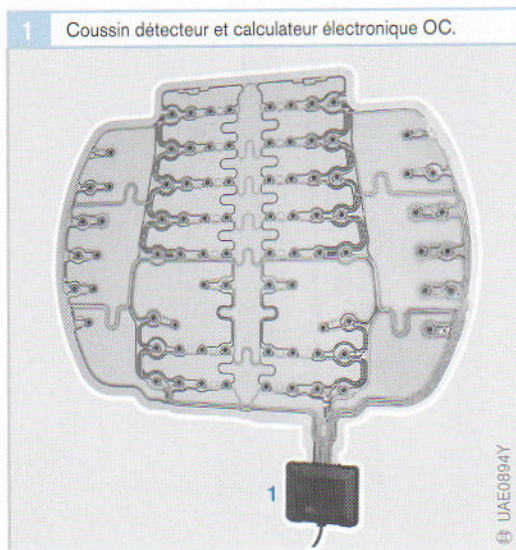


Figure 1  
1 calculateur

Figure 2  
1 calculateur OC  
2 calculateur pour  
coussins gonflables





### Capteurs

Le coussin détecteur OC est essentiellement constitué d'une structure d'éléments résistifs asservis à la pression (éléments FSR : Force Sensitive Resistance), dont les informations sont exploitables de manière sélective. La résistance électrique diminue en cas d'augmentation de la charge mécanique sur un élément détecteur. Cet effet est capté par l'envoi d'un courant de mesure. Une analyse de tous les points de détection permet d'obtenir une indication sur la grandeur de la surface occupée et sur la répartition des points d'appui locaux du profil.

Une antenne émettrice indépendante et deux antennes réceptrices, intégrées au tapis OC, permettent de réaliser la fonction de détection d'un siège enfant. Des transpondeurs, qui équipent les sièges enfant, sont excités à la génération d'un champ émetteur et déclenchent la modulation d'un codage spécifique de ce champ. Les données captées par les antennes réceptrices et exploitées par l'électronique servent à la détection du type et de l'orientation du siège enfant utilisé.

### Calculateur

Le calculateur alimente le tapis détecteur en courants de mesure et exploite les signaux des capteurs à l'aide d'un programme d'algorithmes qui se déroule au niveau du microcontrôleur. Les données de classification et les informations de détection de sièges enfant qui en résultent sont transmises par un protocole cyclique au calculateur de commande des coussins gonflables et participent à l'activation des coussins en accord avec une table de décision.

### Algorithme

Les critères de décision suivant servent, entre autres, à l'analyse de l'empreinte du profil :

#### *Ecart entre les os iliaques :*

Un profil d'assise type montre deux points d'appui qui correspondent à la distance entre les os iliaques du passager.

#### *Surface occupée :*

La grandeur de la surface occupée est matérialisée en corrélation avec le poids du corps.

#### *Cohérence du profil :*

Prise en compte de la structure du profil.

#### *Dynamique :*

Variations du profil en fonction du temps.

3 Profils d'assise du corps humain (a) et corrélation de la distance entre les os iliaques avec le poids du corps (b).

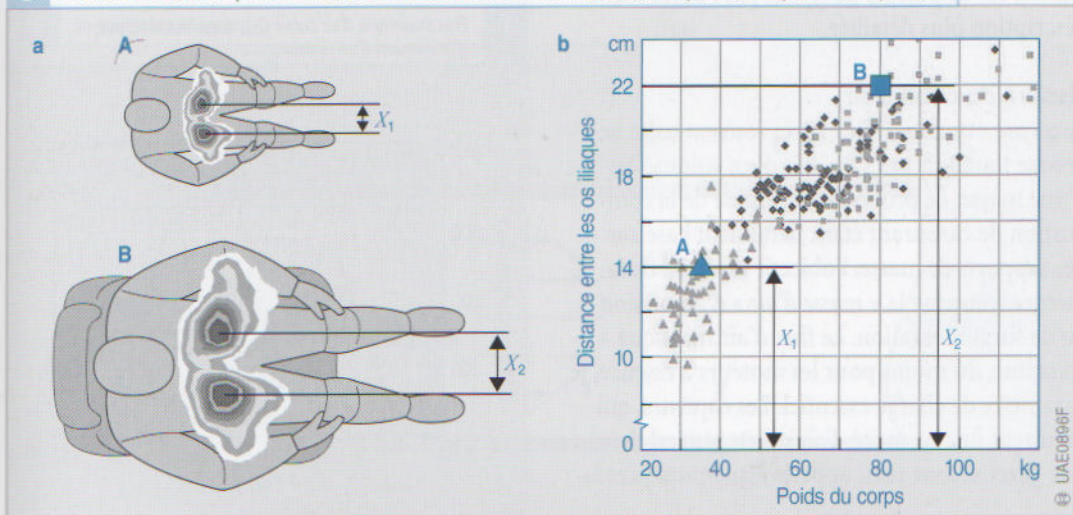


Figure 3

- a profils d'assise
- b diagramme
- A enfant à distance  $X_1$  entre les os iliaques
- B adulte à distance  $X_2$  entre les os iliaques



# Débitmètres

## Grandeurs de mesure

La fonction de mesure des débits en automobile se concentre sur deux applications principales : détection de la quantité de carburant refoulée et surtout mesure de la quantité d'air d'admission nécessaire à la combustion.

### Mesure du débit de carburant

Les systèmes d'injection à commande électronique effectuent le dosage précis de la quantité de carburant requise par la moteur à combustion interne à partir de paramètres bien définis, tels que durée d'injection, position du dispositif de mesure, pression d'injection, température du carburant, etc. Le dosage peut se dérouler en continu ou par intermittence et même sans mesure spéciale du débit.

Les débitmètres de carburant ont été essentiellement mis au point à des époques caractérisées par une nette pénurie de carburant. Ils furent d'abord utilisés pour l'indication de la consommation rapportée à la distance parcourue (en l/100 km) des moteurs à combustion interne sans commande électronique. Toutefois, un problème supplémentaire apparaît dans ce contexte : la consommation réelle de carburant correspond à la différence entre la quantité de carburant refoulée du réservoir et celle y retournant (surtout importante au ralenti). (Problème : différence entre deux valeurs élevées.)

La demande et l'utilisation des débitmètres de carburant étant aujourd'hui quasiment insignifiantes, ces dispositifs ne feront pas l'objet d'une description plus détaillée.

### Mesure du débit d'air

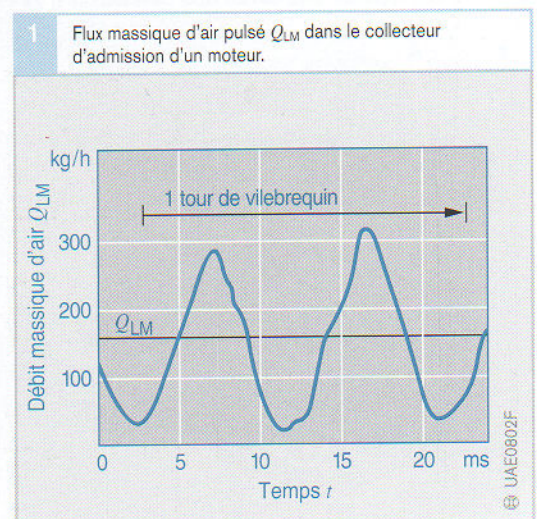
Le terme « quantité d'air » très souvent usité ne précise toutefois pas s'il s'agit d'un volume ou d'une masse. Le processus chimique de la combustion de carburant étant nettement basé sur des rapports de masse, l'objectif explicite de la mesure concerne la « masse d'air » d'admission ou de suralimentation. Le flux d'air massique constitue, du moins pour les moteurs à essence, le paramètre de charge essentiel. Les capteurs, qui mesurent une quantité d'air ou en général des flux gazeux, sont aussi appelés « anémomètres ».

Le débit massique maximal est compris – en moyenne – entre 400 et 1200 kg/h en fonction de la cylindrée du moteur. En raison du faible besoin en air au ralenti des moteurs modernes, le rapport entre les débits d'air minimum et maximum est de l'ordre de 1 : 90 à 1 : 100. Les exigences sévères en matière des émissions à l'échappement et de la consommation imposent le respect d'une précision de 1 à 2 % pour la valeur mesurée. Rapporté à l'étendue de mesure, ce pourcentage peut alors signifier une précision de mesure de  $10^{-4}$  (niveau élevé et inhabituel en automobile).

Le moteur ne reçoit pas l'air sous la forme d'un flux continu, mais au rythme des temps d'ouverture des soupapes d'admission. Il se peut donc que le flux massique d'air soit alors affecté de fortes pulsations (surtout si le papillon est largement ouvert) au niveau du point de mesure qui se trouve toujours dans le collecteur d'admission entre le filtre à air et le papillon (figure 1). Les résonances à l'intérieur du collecteur d'admission génèrent parfois de fortes ondes de pression qui provoquent même de brefs reflux d'air. Ce phénomène apparaît surtout sur les moteurs à quatre cylindres dont les phases d'admission et de charge ne se chevauchent pas (croisement des soupapes). Un débitmètre précis doit donc détecter le sens d'écoulement des flux d'air.

Dans un moteur à quatre cylindres, les pulsations se manifestent au double de la vitesse de rotation du vilebrequin, c.-à-d. à des fréquences de l'ordre

**Figure 1**  
A pleine charge et à une vitesse de rotation  $n = 3000$  tr/min, pression d'admission  $p_s = 0,96$  bar, débit d'air moyen  $Q_{LM} = 157,3$  kg/h





de 50 à 100 Hz. L'utilisation d'un débitmètre à caractéristique linéaire, présentant une bande de fréquences de faible largeur, devrait permettre de suivre la valeur moyenne de ces écoulements à variation rapide. La valeur moyenne est toujours positive et ne nécessite pas forcément une sensibilité de signe.

La plupart des débitmètres d'air utilisés ont toutefois une caractéristique très fortement cou-dée. Les signaux de mesure doivent donc être linéarisés par voie électronique avant leur exploitation. Un moyennage avant la linéarisation peut entraîner d'importantes erreurs dynamiques (« erreur de moyenne »). Ce type de débitmètre doit donc pouvoir suivre avec une rapidité suffisante les pulsations qui, en raison de leur évolution généralement très divergente de la forme sinusoïdale, possèdent également une fraction importante d'harmoniques. Cela nécessite une bande passante d'environ 1000 Hz. Les débitmètres d'air ne doivent pas seulement présenter une grande largeur de bande, mais également une courte constante de mise en action, afin de pouvoir fournir une mesure correcte dès le démarrage du moteur.

Au même titre que tous les autres débitmètres, ceux qui équipent les automobiles sont aussi calibrés pour un écoulement tubulaire à profil symétrique, c.-à-d. pour un écoulement dont le vecteur de vitesse  $v$  dépend, à quasiment chaque point de la section d'écoulement de la surface  $A$ , uniquement du rayon par rapport à l'axe médian et non de l'angle périphérique. Le profil de

l'écoulement (laminaire ou turbulent, figure 2) est, comme on le sait, en corrélation avec la valeur du nombre de Reynolds  $R_e$  :

$$R_e = v \cdot D/\eta$$

où

$D$  représente une section de dimension type et  $\eta$  la viscosité cinématique du fluide.

Le profil de l'écoulement est laminaire ou turbulent si le nombre  $R$  est respectivement inférieur ou supérieur à une valeur d'environ 1200. Si le point de transition se trouve au centre de l'étendue de mesure, il convient alors de s'attendre à une forte irrégularité de la caractéristique. Les applications automobiles se basent toujours sur un écoulement purement turbulent (profil rectangulaire :  $v = \text{const.}$ ). La turbulence peut être obtenue de force par une grille du type d'un crible placée en amont du tube de passage. Cette grille sert simultanément à la protection mécanique de certains systèmes de mesure très sensibles. Si l'on suppose une masse volumique  $\rho$  homogène, il est facile de déterminer le débit :

$$Q_V = v \cdot A$$

débit volumique

$$Q_M = \rho \cdot v \cdot A$$

débit massique

Si la technique de mesure prescrit de longs trajets rectilignes en amont et en aval de l'élément sensible afin de garantir un profil angulaire symétrique, ce préalable n'est pas réalisable en automobile à cause de l'espace restreint disponible

## 2 Profils d'écoulement.

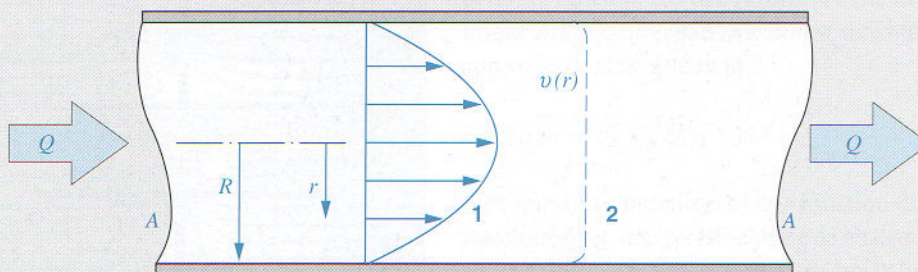


Figure 2

- 1 profil d'écoulement laminaire
- 2 profil d'écoulement turbulent
- A maître-couple du tube
- $Q$  débit
- $R$  rayon du tube
- $r$  distance par rapport au centre du tube
- $v(r)$  profil d'écoulement



## Débitmètres

dans le compartiment moteur. Si de fortes asymétries apparaissent, le calibrage du débitmètre doit alors s'effectuer en fonction des conditions de montage.

Les « débitmètres à pression dynamique », dont le fonctionnement sera décrit en détail au paragraphe suivant, réagissent à la perte de charge  $\Delta p$  au niveau d'un étranglement voulu de la section de passage (organe déprimogène) et mesurent une valeur de débit qui ne correspond ni au débit volumique, ni au débit massique, mais qui représente une moyenne géométrique de ces deux paramètres :

$$Q_{St} = const \cdot \sqrt{\rho} \cdot v = const \cdot \sqrt{Q_V \cdot Q_M}$$

Dans ces conditions, la perte de charge au niveau du débitmètre ne doit pas être inférieure à une valeur de l'ordre de 20 à 30 mbar (surtout en régime de pleine charge).

## Principes de mesure

Parmi le grand nombre de débitmètres connus, seuls ceux fonctionnant selon le principe de la pression dynamique, nécessitant une correction pour compenser les variations de masse volumique et disposant encore de pièces mécaniques mobiles, se sont d'abord imposés pour la mesure de la quantité d'air admise par les moteurs des véhicules automobiles.

Aujourd'hui, l'utilisation de vrais débitmètres massiques à procédé thermique (anémomètres à « fil chaud » ou à « film chaud »), qui peuvent suivre des variations rapides de débit sans faire appel à des pièces mécaniques mobiles, semble se généraliser.

### Diaphragmes de détection variables (volets-sondes)

Le calcul de la perte de charge au niveau d'un diaphragme fixe s'effectue sur la base de deux lois :

Equation de continuité :

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = const$$

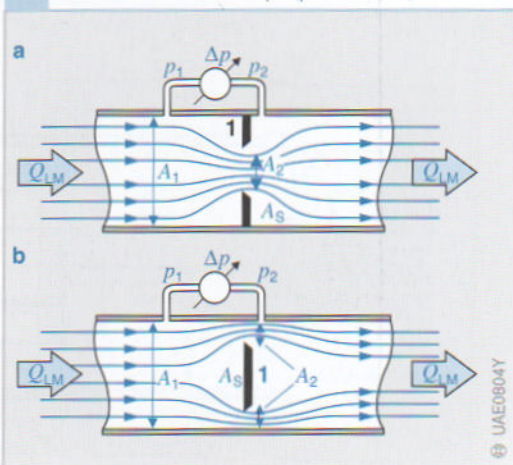
Equation de Bernoulli :

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho_2 \cdot v_2^2 = const$$

Figure 3

- a anneau-diaphragme
- b disque-diaphragme (plateau-sonde)
- 1 diaphragme
- $A_S$  section du disque
- $A_{1,2}$  sections de mesure
- $p_{1,2}$  pressions de mesure
- $\Delta p$  perte de charge
- $Q_{LM}$  flux massique d'air

3 Débitmètres à pression dynamique à diaphragme en forme d'anneau ou de disque (plateau-sonde).





Ces lois sont applicables à deux sections de mesure différentes  $A_1$  et  $A_2$  (figure 3).

En supposant une masse volumique constante  $\rho = \rho_1 = \rho_2$ , on obtient la perte de charge :

$$\Delta p = Q_V^2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right)$$

Cette perte de charge peut être mesurée soit directement à l'aide d'un capteur de pression différentielle, soit sous la forme d'une force agissant sur un « volet-sonde » (figure 3).

En raison de la relation quadratique avec le débit, les diaphragmes fixes n'autorisent qu'une variation de la grandeur de mesure de 1 : 10. La couverture de plages plus importantes demande l'utilisation de plusieurs diaphragmes ou bien d'organes qui s'adaptent automatiquement à l'étendue de mesure par libération d'une plus grande section de passage  $A_2$  sous l'effet de la pression dynamique.

De tels diaphragmes mobiles permettent de couvrir efficacement les plages de variation voulues de 1 : 100. Lorsque le débit augmente, le volet-sonde se déplace alors à l'intérieur d'un profil bien étudié en s'opposant à une contreforce généralement constante. La géométrie de ce profil est dessinée de telle sorte que la loi d'écoulement en fonction de la distance et de l'angle suive l'évolution

linéaire (K-Jetronic) ou bien non linéaire (L-Jetronic) prévue. La position du « volet-sonde » (figure 4) représente le paramètre de débit qui se trouve en relation avec la pression dynamique définie précédemment. La fréquence limite type de ces capteurs est toutefois de l'ordre de 10 Hz.

En cas d'apparition de fréquences pulsatoires plus élevées, de tels volets ne peuvent plus suivre la grandeur de mesure ; ils représentent donc pour les pulsations un diaphragme quasiment fixe à caractéristique quadratique. De plus, des états de charge bien définis peuvent provoquer d'importantes erreurs de moyenne qui ne peuvent être compensées que de façon approximative par des logiciels adéquats.

Si la masse volumique  $\rho$  de l'air d'admission varie en raison de fluctuations de température et/ou d'altitude, la modification du signal de mesure n'atteint alors que  $\sqrt{\rho}$ . La détection efficace d'une variation de la masse volumique impose l'utilisation d'un capteur de température d'air et d'un capteur barométrique (pression atmosphérique).

#### Anémomètres à fil/film chaud

Le passage d'un courant  $I_H$  dans un fil mince de résistance électrique  $R$  provoque son échauffement. Si ce fil est balayé simultanément par un fluide de masse volumique  $\rho$  à la vitesse  $v$ , un équilibre se crée alors entre la puissance électrique fournie  $P_{el}$  et la puissance pneumatique dissipée (de l'écoulement)  $P_V$  :

$$P_{el} = I_H^2 \cdot R = P_V = c_1 \cdot \lambda \cdot \Delta \vartheta$$

Dans ce cas, la puissance prélevée sur l'écoulement est proportionnelle à la différence de température obtenue  $\Delta \vartheta$  et à la conductivité thermique  $\lambda$ . L'équation suivante donne une bonne approche de cette grandeur :

$$\lambda = \sqrt{\rho \cdot v} + c_2 = \sqrt{Q_{LM}} + c_2$$

Bien que  $\lambda$  soit initialement une fonction du flux massique  $Q_{LM}$ , une certaine perte de chaleur (convection) se manifeste aussi lorsque le fluide se trouve au repos ( $v = 0$ ). Cette perte de chaleur est représentée par la constante additive  $c_2$ .

4 Débitmètre à pression dynamique à disque-diaphragme mobile variable (volet-sonde).

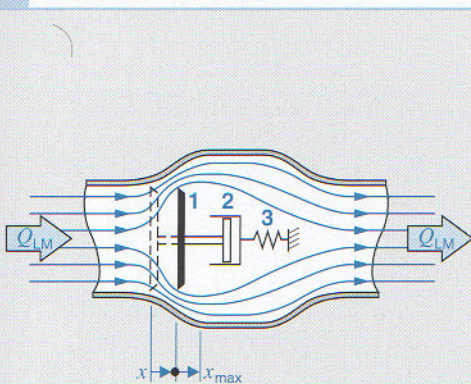


Figure 4

- 1 diaphragme
  - 2 amortisseur
  - 3 ressort de rappel mou
- $Q_{LM}$  flux massique d'air  
 $x = x(Q_{LM})$  position du volet-sonde en fonction du débit



L'équation suivante matérialise donc la relation entre le courant de chauffage  $I_H$  et le flux massique  $Q_{LM}$  :

$$I_H = c_1 \cdot \sqrt{(\sqrt{Q_{LM}} + c_2) \sqrt{\frac{\Delta \vartheta}{R}}}$$

L'apport d'une puissance de chauffage constante  $I_H^2 R$  – facilement réalisable – se traduirait par l'obtention d'une augmentation de température  $\Delta \vartheta$  décroissant réciproquement en fonction de la racine carrée du flux massique d'air  $Q_{LM}$ . Si le courant de chauffage  $I_H$  est cependant réglé de manière à conserver un niveau constant de surtempérature (p. ex.  $\Delta \vartheta = 100$  K) même en cas d'augmentation du débit, le paramètre spécifique du débit massique correspond alors une augmentation du courant de chauffage équivalente à la racine biquadratique du flux massique.

L'avantage essentiel d'un tel circuit de régulation est que la résistance chauffante électrique se trouve toujours à la même température, c.-à-d. que sa capacité thermique n'a pas besoin d'être réadaptée par des « transferts de chaleur » qui exigent beaucoup de temps. En réalité, l'emploi d'un fil de platine d'une épaisseur de  $70 \mu\text{m}$  permet d'obtenir par exemple des constantes de temps avoisinant 1 ms pour une variation de débit, alors qu'elles sont de 40 à 100 fois supérieures sans régulation (figure 5).

Si la régulation sur une température constante du réchauffeur s'effectuait tout simplement en main-

tenant constante sa résistance (qui dépend de la température), il en résulterait – pour un débit volumique constant, mais une température plus élevée du fluide – une réduction du courant et, par conséquent, une erreur de mesure. Dans la pratique, cette erreur est évitée à l'aide d'un circuit en pont qui dispose d'une seconde « résistance de compensation »  $R_K$  du même type (p. ex. en platine), mais à haute valeur ohmique et non chauffée. La résistance chauffante est réglée à une *surtempérature constante*  $\Delta \vartheta$  vis-à-vis du fluide (figure 6). En cas d'augmentation brusque de la température du fluide, le capteur réagit cependant avec une constante de temps plus longue, car la capacité thermique du fil chaud nécessite alors un réajustement.

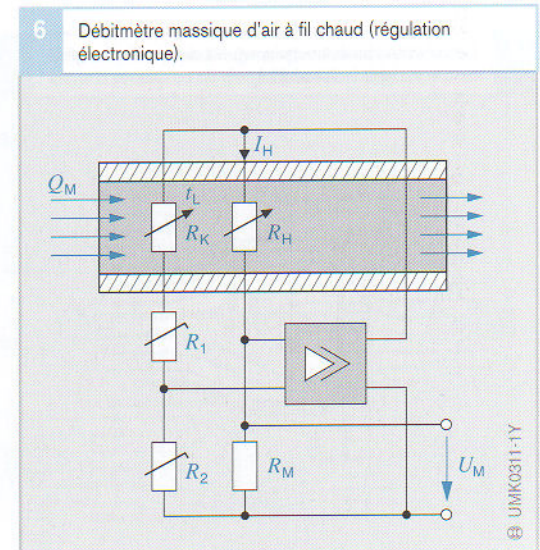
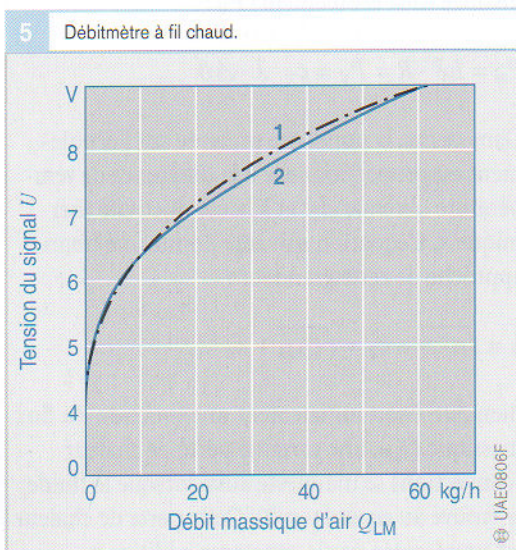
La résistance chauffante des premiers anémomètres (HLM) mesurant le flux massique et équipant les véhicules automobiles était réellement constituée d'un *fil de platine* mince. Ce fil était tendu en forme de trapèze au-dessus de la section de passage de telle sorte qu'il était possible de détecter d'éventuelles asymétries du profil d'écoulement. Une durée de vie intéressante sur le plan technique n'a pu toutefois être atteinte qu'en réussissant à stabiliser le fil de platine par l'adjonction d'alliages, afin que sa valeur de résistance ne varie pas sous les effets de craquage et de dépôt à sa surface. Pour éliminer les dépôts éventuels, le fil chaud devait être soumis à un autonettoyage à haute température (env.  $1000^\circ\text{C}$ ) après chaque phase de fonctionnement.

Figure 5

- 1 courbe caractéristique théorique
- 2 courbe caractéristique expérimentale

Figure 6

- $Q_{LM}$  flux massique d'air
- $U_M$  tension de mesure
- $R_H$  résistance du fil chaud
- $R_K$  résistance de compensation
- $R_M$  résistance de mesure
- $R_{1,2}$  résistances d'étalonnage





Malgré ses avantages fonctionnels évidents, ce type de capteur était trop onéreux à long terme. Certes, une *version en technologie à couches épaisses* (HFM2) pouvait regrouper toutes les résistances sur un substrat unique, mais ne donnait pas les avantages économiques escomptés. A cause de la capacité thermique relativement importante du substrat céramique utilisé, il n'était pas facile de ne pas dépasser la constante de temps d'activation maximale admissible. Il fallait également atténuer les effets indésirables d'un couplage thermique entre les résistances chauffante et compensatrice par réalisation d'une taille complexe en dents de scie. En revanche, cette version pouvait déjà renoncer à un autonettoyage du fil chauffant, car les conditions spécifiques d'écoulement n'entraînaient plus la formation de dépôts nuisibles.

Par opposition aux deux types précédents, une nouvelle version (HFM5) réalisée en *micromécanique et à base de silicium* a pu répondre pratiquement à toutes les attentes. Elle est surtout capable de mesurer dans les deux sens d'écoulement avec le signe correct (figure 7), si bien que les reflux de courte durée, générés par des pulsations, n'entraînent plus d'erreurs de mesure (figure 8).

A cet effet, le circuit de régulation de chauffage utilisé jusqu'à présent est complété par deux capteurs de température disposés de chaque côté de la résistance chauffante, c.-à-d. en amont et en

aval du flux d'écoulement (cf. « procédé Thomas » décrit dans la littérature technique). En l'absence d'écoulement ( $Q_{ML} = 0$ ), chacun des capteurs indique la même température. Dès qu'un écoulement se produit, la différence de température des deux résistances augmente, car le capteur amont est refroidi par le fluide et le capteur aval réchauffé en supplément. Le signal de sortie résultant de la différence de température suit une caractéristique semblable à celle des anémomètres connus jusqu'à présent ; son signe représente toutefois nettement le sens d'écoulement.

En raison de son faible encombrement, ce débitmètre micromécanique ne constitue toutefois qu'un détecteur de flux partiel, c.-à-d. qu'il n'est plus en mesure de dépister – même approximativement – d'éventuelles irrégularités de la vitesse d'écoulement par rapport à la section de passage. Sa fonction consiste surtout à faire en sorte que le petit flux partiel, qu'il a déterminé, représente toujours la même fraction du flux total sur l'ensemble de la plage de mesure. Cette fonctionnalité n'est pas toujours facile à réaliser.

### Exemples d'application

- débitmètre volumique d'air à volet-sonde LMM,
- débitmètre massique d'air à fil chaud HLM,
- débitmètre massique d'air à film chaud HFM2,
- débitmètre massique d'air à film chaud HFM5.

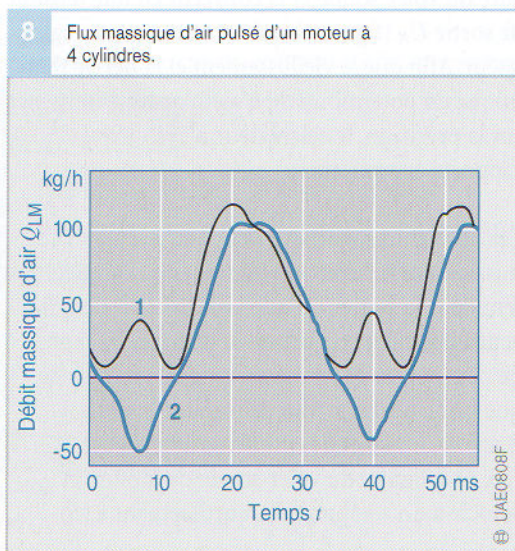
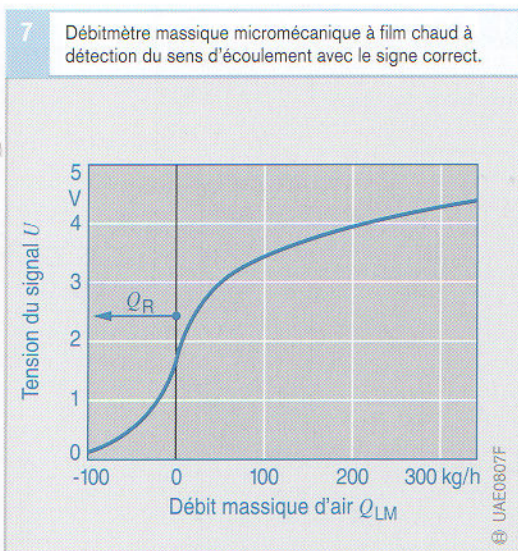


Figure 7  
 $Q_R$  reflux

Figure 8  
A pleine charge et à une vitesse de rotation  $n = 900$  tr/min  
1 débitmètre massique à fil chaud  
2 débitmètre massique à film chaud