

Débitmètre volumique d'air à volet-sonde LMM

Applications

Le débitmètre LMM est encore utilisé sur de nombreux moteurs à essence équipés de différentes versions d'un système d'injection L- ou M-Motronic. Il est positionné entre le filtre à air et le papillon. Sa fonction est de détecter le flux volumique d'air Q_L aspiré par le moteur en vue de la détermination de la charge suivant le principe de la pression dynamique (figures 1 à 3).

Conception et fonctionnement

Le volet-sonde mobile du débitmètre d'air (figure 1, rep. 1) joue le rôle d'un diaphragme variable. Le flux d'air d'admission Q_L déplace le volet contre la force constante d'un ressort de rappel de telle sorte que la section de passage libre s'agrandit au fur et à mesure que le débit d'air augmente.

La variation de la section de passage libre du débitmètre en fonction de la position du volet-sonde a été étudiée de manière à obtenir une corrélation logarithmique entre l'angle du volet et le volume d'air aspiré. Il en résulte une grande sensibilité de l'appareillage pour de faibles débits d'air qui imposent une haute précision métrologique. La précision requise représente 1 à 3 % de la valeur de mesure sur une étendue de Q_{\max} : $Q_{\min} = 100 : 1$.

Un potentiomètre (4) saisit la position angulaire du volet-sonde et la convertit en une tension de sortie U_A (figure 4) qui est transmise au calculateur. Afin que le vieillissement et la dérive thermique du potentiomètre n'aient aucune influence sur la précision, le calculateur n'évalue que des rapports de résistance.

Les oscillations, qui sont dues aux courses d'admission des différents cylindres et qui se répercutent dans le système d'admission du moteur, doivent également être prises en compte. Le capteur ne peut suivre de telles variations de fréquence que jusqu'à 10 Hz. Afin de minimiser ces influences, un volet de compensation (figure 1, rep. 6) solidaire du volet-sonde de mesure et associé à un « volume d'amortissement » (5)

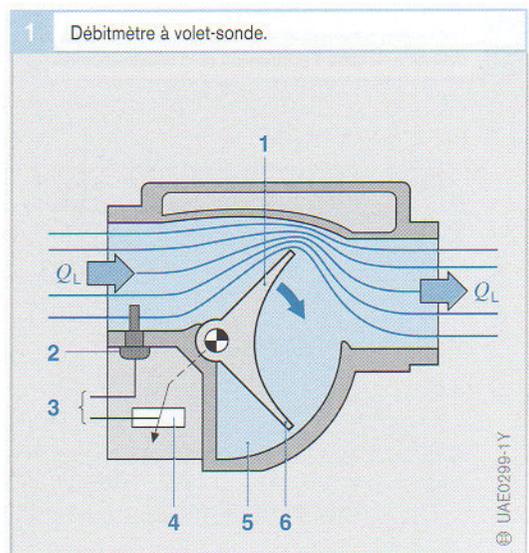
amortit les vibrations générées par le flux d'air pulsatoire.

La mesure basée sur le principe de la pression dynamique ne détermine pas le flux massique effectif, qui est proportionnel au produit de $\rho \cdot v$, mais seulement une valeur de débit qui est proportionnelle au produit de $\sqrt{\rho} \cdot v$. Le dosage précis du carburant nécessite donc une correction de la masse volumique (température de l'air, pression atmosphérique).

Afin de tenir compte des variations de la masse volumique de l'air en cas de fluctuations de la température de l'air d'admission, le calculateur détermine une valeur de correction à partir de la résistance thermométrique d'un capteur de température (2) intégré au débitmètre d'air. Les versions destinées au M-Motronic prévoient également une correction barométrique. A cet effet, un capteur de pression d'admission communique pneumatiquement avec le collecteur d'admission et détecte ainsi la pression d'air d'admission absolue. Il est soit incorporé au calculateur (un flexible le relie au collecteur d'admission), soit monté à proximité du collecteur ou fixé directement sur celui-ci.

Figure 1

- 1 volet-sonde
 - 2 capteur de température d'air
 - 3 vers le calculateur
 - 4 potentiomètre
 - 5 volume d'amortissement
 - 6 volet de compensation
- Q_L flux d'air d'admission



2 Débitmètre à volet-sonde (vue côté air).

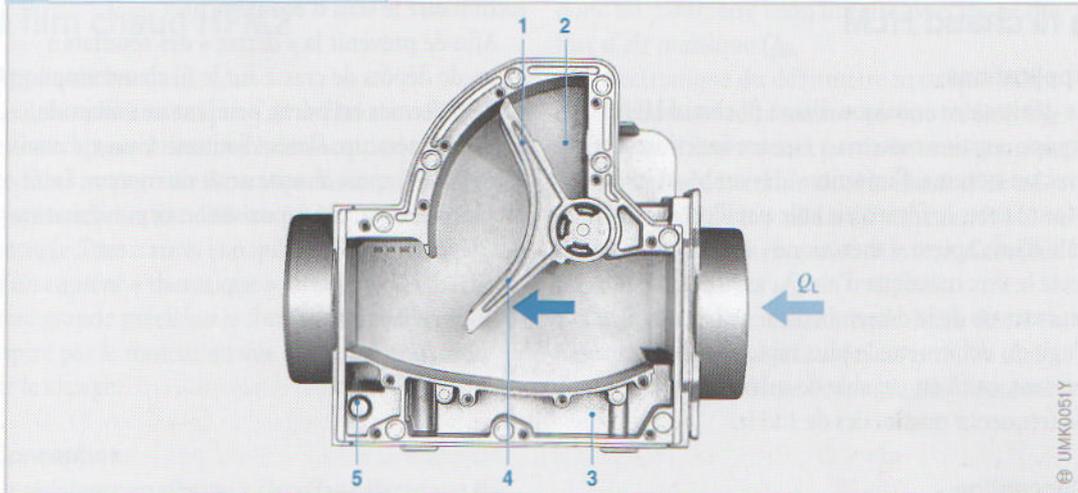


Figure 2

- 1 volet de compensation
 - 2 volume d'amortissement
 - 3 canal de dérivation
 - 4 volet-sonde
 - 5 vis de réglage du mélange de ralenti (en dérivation)
- Q_L flux d'air d'admission

3 Débitmètre à volet-sonde (vue côté connexions).

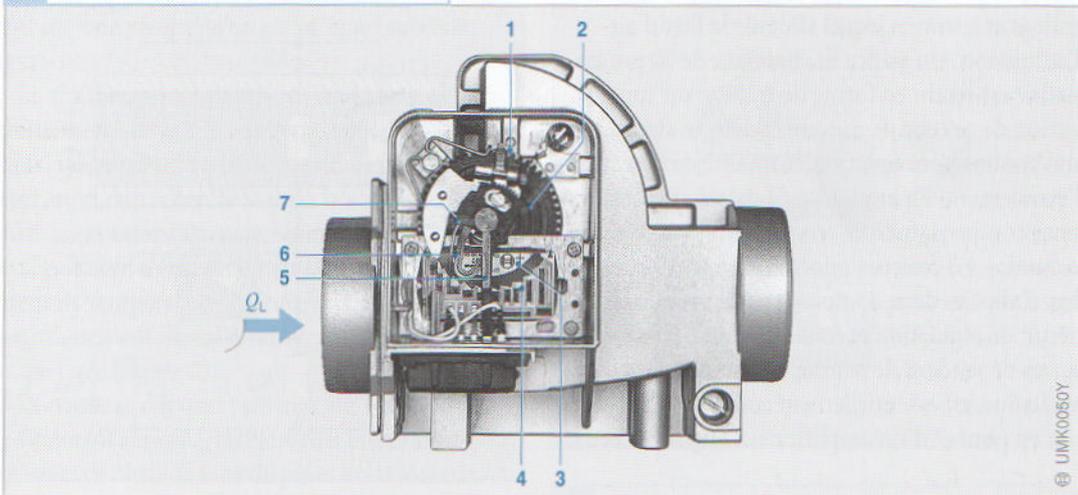


Figure 3

- 1 couronne dentée de tarage du ressort
 - 2 ressort de rappel
 - 3 piste de curseur
 - 4 plaque en céramique avec résistances et pistes conductrices
 - 5 contact de curseur
 - 6 curseur
 - 7 contact de pompe
- Q_L flux d'air d'admission

4 Débitmètre à volet-sonde (circuit potentiométrique et courbe de tension).

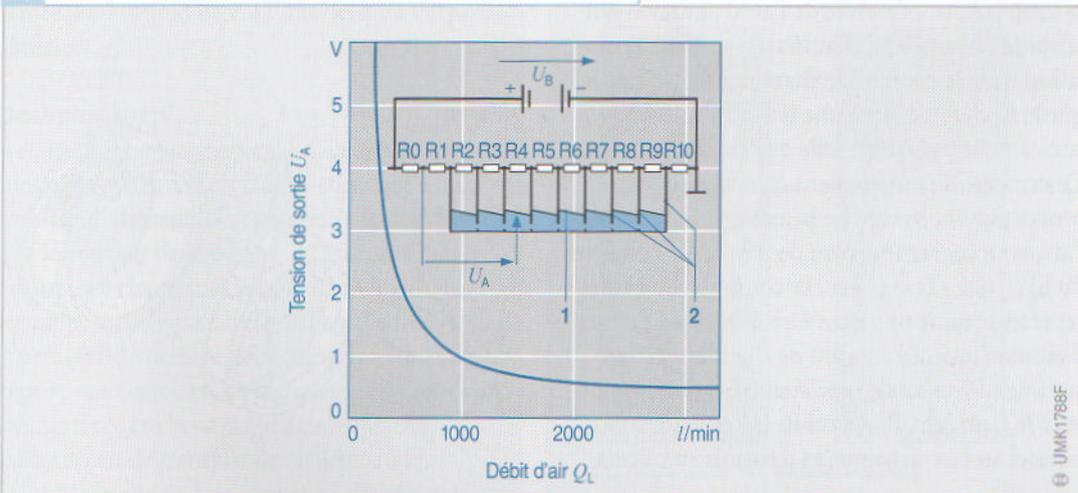


Figure 4

- 1 piste de curseur
- 2 rampes conductrices (points d'appui)

La courbe caractéristique se base sur : $U_A \sim 1/Q_L$

UMK0051Y

UMK0050Y

UMK1788F

Débitmètre massique d'air à fil chaud HLM

Applications

Le débitmètre massique d'air à fil chaud HLM équipe certains moteurs à essence fonctionnant avec un système d'injection LH- ou M-Motronic. Monté entre le filtre à air et le papillon, il joue le rôle d'un capteur « thermique » de charge. Il détecte le flux massique d'air Q_M aspiré par le moteur en vue de la détermination de la charge. Il s'agit du débitmètre le plus rapide connu jusqu'à présent, car il est capable de suivre des variations de fréquence maximales de 1 kHz.

Conception

Ce type de débitmètre est constitué d'un corps tubulaire protégé à chaque extrémité par un grillage et à travers lequel s'écoule le flux d'air d'admission. Un mince fil chauffant de $70 \mu\text{m}$ en platine est tendu en forme de trapèze sur toute la section de ce tube de mesure et détecte ainsi, avec une bonne approximation, la totalité de la section d'écoulement. En amont du fil chaud, une résistance compensatrice de température (réalisée en technologie à couches minces) plonge dans le flux d'air. Ces deux composants font partie d'un circuit de régulation et font fonction de résistances dépendant de la température. Le circuit de régulation est essentiellement constitué d'un circuit en pont et d'un amplificateur (figures 1 et 2).

Fonctionnement

La résistance de compensation mesure d'abord la température à l'arrivée de l'air d'admission qui refroidit ensuite le fil chauffé. Un circuit de régulation règle le courant de chauffage de telle sorte que le fil chaud adopte une température constante supérieure à celle de l'air d'admission. Ce principe de mesure tient compte, dans des proportions correctes, de la masse volumique de l'air, car il cogère le niveau de transfert de chaleur du fil chaud à l'air admis. Le courant de chauffage représente donc un paramètre spécifique du flux d'air massique. Le courant de chauffage génère sur une résistance de précision (résistance de mesure R_M) un signal de tension U_M qui est proportionnel au flux massique et transmis au calcula-

teur. Le débitmètre HLM ne peut cependant pas reconnaître le sens d'écoulement.

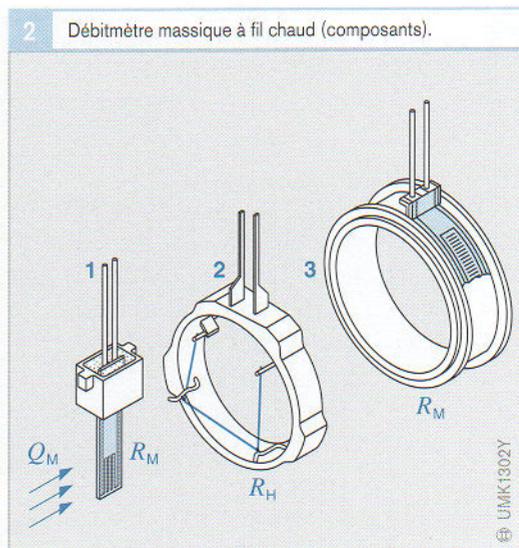
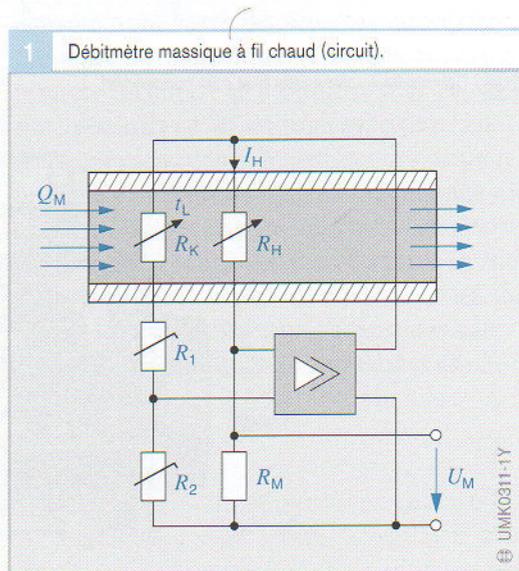
Afin de prévenir la « dérive » des résultats à cause de dépôts de crasse sur le fil chaud en platine, ce dernier est porté, pendant une seconde, à une température élevée d'autonettoyage d'environ $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ après chaque arrêt du moteur. Le fil est alors nettoyé par vaporisation et pulvérisation des dépôts.

Figure 1

- R_K résistance de compensation de température
- R_H résistance chauffante du fil chaud
- R_M résistance de mesure
- $R_{1,2}$ résistances d'étalonnage du pont
- U_M tension de mesure
- I_H courant de chauffage
- t_L température de l'air
- Q_M flux massique d'air

Figure 2

- 1 résistance de compensation de température R_K
- 2 bague de détection avec fil chaud R_H
- 3 résistance de précision (résistance de mesure R_M)
- Q_M flux massique d'air



Débitmètre massique d'air à film chaud HFM2

Applications

Le débitmètre massique d'air à film chaud HFM2 est un capteur à couches épaisses qui équipe certains moteurs à essence fonctionnant avec un système d'injection LH- ou M-Motronic. Monté entre le filtre à air et le papillon, il joue le rôle d'un capteur « thermique » de charge. Il détecte avec grande précision le flux massique d'air Q_M aspiré par le moteur en vue de la détermination de la charge.

Conception

La résistance en platine à chauffage électrique R_H (réchauffeur) et les résistances en pont du débitmètre massique d'air à film chaud HFM2 se trouvent sur une plaquette en céramique (substrat, figure 1).

Le circuit en pont comporte également une résistance asservie à la température R_S (sonde de débit) qui saisit la température du réchauffeur. La séparation du réchauffeur et de la sonde de débit offre des avantages pour la conception du circuit de régulation. L'élément chauffant et le compensateur de température d'air R_K sont découplés thermiquement du substrat céramique par découpe laser (figure 2).

La crasse se déposant surtout sur l'arête avant de l'élément sensible, les éléments essentiels au transfert de chaleur sont disposés en aval sur le substrat céramique. De plus, le capteur est conçu de telle sorte qu'un encrassement éventuel n'influence pas l'écoulement à l'intérieur du corps tubulaire.

Fonctionnement

La résistance en platine à chauffage électrique plonge dans le flux d'air d'admission qui assure son refroidissement. Un circuit de régulation règle le courant de chauffage de telle sorte que la résistance chauffante adopte une température constante supérieure à celle de l'air d'admission. Ce principe de mesure tient compte, dans des proportions correctes, de la masse volumique de l'air, car il cogère la vitesse d'écoulement ainsi que le niveau de transfert de chaleur du film chaud à l'air admis. Le courant de chauffage I_H

ou la tension appliquée au réchauffeur représente donc un paramètre (non linéaire) spécifique du flux d'air massique Q_M .

L'électronique du débitmètre massique à film chaud convertit cette tension en une tension U_M adaptée au calculateur. A partir de cette grandeur, le calculateur détermine alors la masse d'air admise par cycle de travail. Le débitmètre HFM2 ne peut cependant pas reconnaître le sens d'écoulement.

La précision de mesure longue durée de $\pm 4\%$, rapportée à la valeur mesurée, est garantie sans élimination par brûlage des particules de crasse.

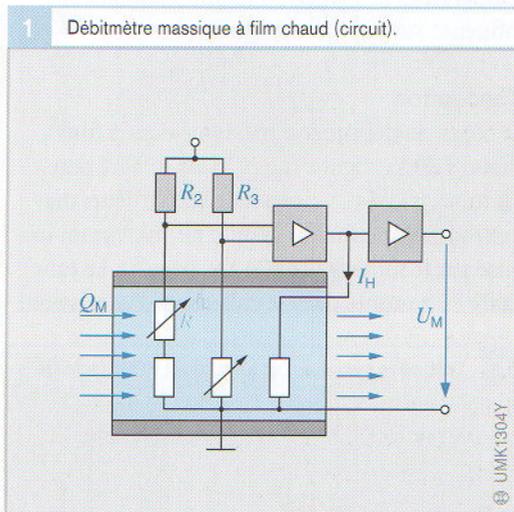


Figure 1

R_K compensateur de température
 R_H résistance chauffante
 R_S résistance du capteur
 R_1 , résistances du pont de mesure
 R_2 , de mesure
 R_3
 U_M tension de mesure
 I_H courant de chauffage
 t_L température de l'air
 Q_M flux massique d'air

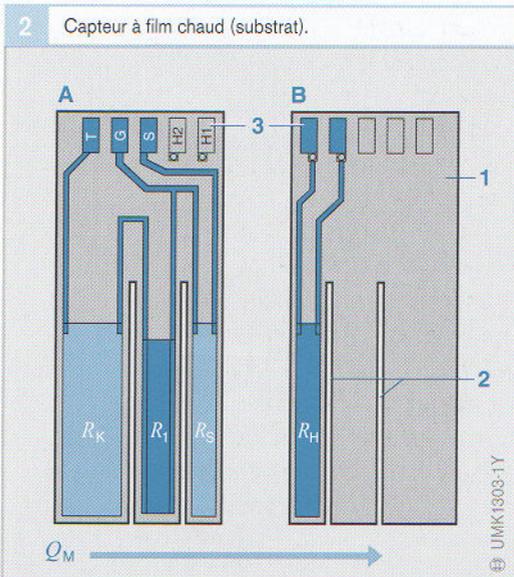


Figure 2

A face avant
 B face arrière
 1 substrat en céramique
 2 deux découpes laser
 3 contacts
 R_K compensateur de température
 R_H résistance chauffante
 R_S résistance du capteur
 R_1 résistance du pont de mesure

Débitmètre massique d'air à film chaud HFM5

Applications

Une combustion optimale dans le cadre des limites des émissions à l'échappement fixées par la législation impose le dosage précis de la masse d'air nécessaire à chaque état de fonctionnement du moteur.

A cet effet, le débitmètre massique d'air à film chaud mesure exactement une partie du flux d'air total qui traverse réellement le filtre à air ou le tube calibré. Il tient également compte des pulsations et reflux dus à l'ouverture et à la fermeture des soupapes d'admission. Les variations de la température de l'air d'admission n'ont aucune influence sur la précision de mesure.

Conception

Le corps du débitmètre massique d'air à film chaud HFM5 (figure 1, rep. 5) est intégré dans un tube calibré (2) disponible en plusieurs diamètres, en fonction du débit d'air maximum imposé par le moteur (de 370 à 970 kg/h). Le tube calibré est monté dans le collecteur d'admission,

en aval du filtre à air. Il existe également des capteurs enfichables qui sont incorporés au filtre à air.

Une cellule de mesure (4), qui est « balayée » par un flux partiel d'air d'admission (8), et une électronique d'exploitation (3) constituent les composants essentiels du capteur.

Les éléments de la cellule de mesure sont déposés sur un substrat semi-conducteur, ceux de l'électronique d'exploitation (circuit hybride) sur un substrat en céramique. L'ensemble est donc d'une grande compacité. Des connexions électriques (1) assurent le raccordement de l'électronique d'exploitation au calculateur. La forme du canal de mesure du flux partiel (6) est telle que l'air passe sur la cellule de mesure puis retourne au tube calibré par la sortie (7) sans formation de tourbillons. Cette technique permet l'amélioration de la réponse du capteur en cas d'écoulements fortement pulsés et la détection des reflux éventuels (figure 2).

Fonctionnement

Le débitmètre massique d'air à film chaud est un « capteur thermique ». Son principe de fonctionnement est le suivant :

Une résistance disposée au centre de la cellule de mesure (figure 3, rep. 3) chauffe une membrane de détection micromécanique (5) et la maintient à une température constante. En dehors de cette zone de chauffage régulée (4) la température baisse des deux côtés.

La répartition de la température sur la membrane est saisie par deux thermorésistances disposées symétriquement sur la membrane, de part et d'autre de la résistance de chauffage (points de mesure M_1 , M_2). En l'absence de circulation d'air, le profil de température (1) est le même des deux côtés ($T_1 = T_2$).

Dès que de l'air passe sur la cellule de mesure, le profil de température homogène varie au niveau de la membrane (2). Du côté de l'admission, le profil de température est plus abrupt, car l'air qui circule refroidit cette zone. Du côté opposé, celui du moteur, la cellule de mesure commence par se

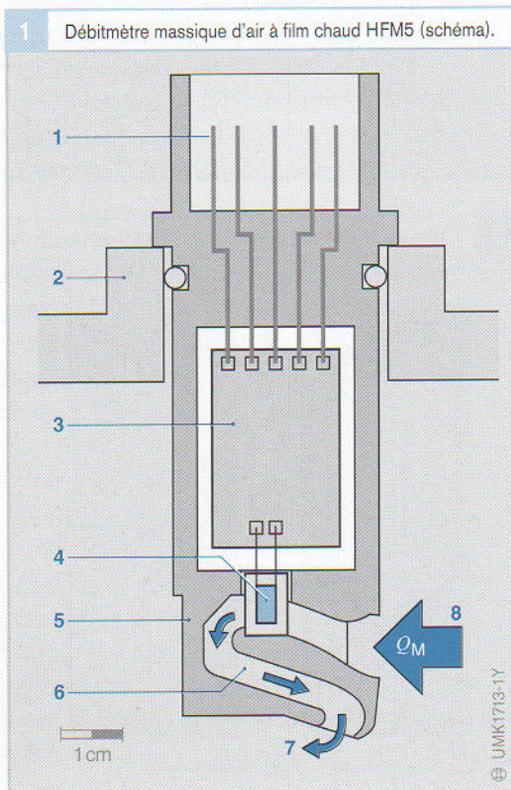


Figure 1

- 1 connexions électriques (fiches)
- 2 paroi du tube calibré ou du boîtier du filtre à air
- 3 électronique d'exploitation (circuit hybride)
- 4 cellule de détection
- 5 boîtier de capteur
- 6 canal de mesure du flux partiel
- 7 sortie du flux partiel de mesure Q_M
- 8 entrée du flux partiel de mesure Q_M

refroidir, puis l'air réchauffé par l'élément chauffant contribue au réchauffement progressif de la cellule de mesure. Du fait de la variation de la répartition de température, une différence de température (ΔT) apparaît entre les points de mesure M_1 et M_2 .

La chaleur transmise à l'air et l'évolution de la température sur la cellule de mesure dépendent de la masse d'air qui traverse le capteur. La différence de température (indépendante de la température absolue du flux d'air) est un paramètre qui permet de déterminer la masse du flux d'air. En outre, elle dépend du sens du flux, de sorte que le débitmètre peut également détecter la valeur ainsi que le sens du flux massique d'air.

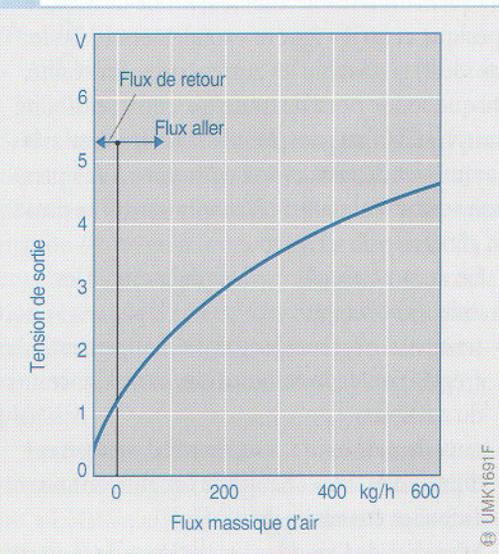
Grâce à la très faible épaisseur de la membrane micromécanique, le capteur réagit très vite aux variations (< 15 ms). Cet avantage est très important dans le cas de flux d'air fortement pulsés.

La différence de résistance entre les points de mesure M_1 et M_2 est convertie par l'électronique d'exploitation intégrée au capteur en un signal de tension analogique compris entre 0 et 5 V et adapté au calculateur. La tension mesurée est convertie, à partir de la courbe caractéristique du capteur mémorisée dans le calculateur (figure 2), en une valeur qui exprime le débit massique [kg/h].

L'allure de la courbe est conformée de manière à ce que le diagnostic intégré au calculateur puisse déceler les incidents, p. ex. la coupure d'un conducteur. Un capteur de température peut être intégré au débitmètre HFM5 pour des évaluations annexes. Il se trouve sur la cellule de mesure, en amont de la zone de chauffage.

Il n'est pas nécessaire à la détermination de la masse d'air. Certaines applications automobiles imposent des mesures supplémentaires pour l'amélioration de la séparation de l'eau et de la crasse (tube intérieur, grille de protection).

2 Tension de sortie d'un débitmètre massique d'air à film chaud en fonction du flux partiel de mesure en circulation.



3 Principe de mesure du débitmètre massique d'air à film chaud.

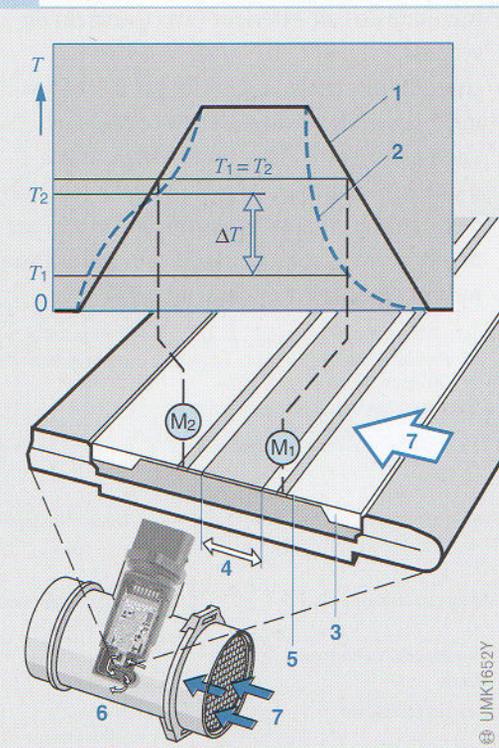


Figure 3
 1 profil de température sans afflux d'air
 2 profil de température avec afflux d'air
 3 cellule de détection
 4 zone de chauffage
 5 membrane du capteur
 6 débitmètre et tube calibré
 7 flux d'air d'admission
 M_1, M_2 points de mesure
 T_1, T_2 valeurs de température aux points de mesure M_1 et M_2
 ΔT différence de température

Capteurs de gaz, sondes de concentration

Grandeurs de mesure

La concentration d'une substance bien précise indique la fraction de masse ou de volume qui est contenue dans un autre corps ou dans un mélange d'autres substances. La principale caractéristique d'un capteur de concentration (appelé aussi « sonde de concentration ») est qu'il est uniquement sensible à *un seul* fluide de mesure spécifique et qu'il « ignore » totalement (dans le cas idéal) si possible les autres corps. En réalité, chaque sonde possède toutefois une « sensibilité transversale » aux autres substances, même si les paramètres de mesure « température » et « pression » sont maintenus constants (ce qui se passe en général).

En automobile, il convient de mesurer les grandeurs suivantes :

- teneur en oxygène des gaz d'échappement (régulation de la combustion, surveillance du catalyseur),
- taux de monoxyde de carbone, d'azote et d'humidité dans l'habitacle (qualité de l'air, embuage des vitres du véhicule),
- humidité de l'air dans les systèmes de freinage pneumatiques (surveillance des dessiccateurs d'air),
- humidité de l'air extérieur (avertissement de verglas),
- concentration de suie dans les gaz d'échappement des moteurs diesel. Dans ce cas, il ne s'agit pas d'une concentration de gaz, mais d'une concentration de particules. La fonction de mesure est rendue plus difficile, car des particules peuvent colmater le capteur jusqu'à son incapacité de fonctionnement.

L'introduction des piles à combustible comme système de traction des automobiles demandera la mise au point d'autres capteurs de composition gazeuse, p. ex. pour la détection de l'hydrogène.

Principes de mesure

Les substances à mesurer étant à l'état gazeux, liquide ou solide, un grand nombre de méthodes de mesure ont été mises au point au cours des années passées. Au niveau de l'automobile, seuls les domaines de l'analyse des gaz et de la mesure spécifique de l'humidité sous forme gazeuse présentent un intérêt. Le tableau 1 donne un aperçu des méthodes utilisées habituellement en métrologie.

Mesure de composition gazeuse (en général)

Les capteurs de gaz, qui sont généralement exposés directement et sans protection au milieu à mesurer (c.-à-d. à des corps étrangers), risquent de subir des *dommages* irréversibles. Ce genre d'incident est aussi souvent appelé « contamination ». Ainsi, les sondes électrolytiques à oxygène (sondes « lambda ») peuvent être contaminées et rendues inutilisables par le plomb éventuellement présent dans le carburant ou les gaz d'échappement.

Hygrométrie

Outre le rôle essentiel joué par la sonde à oxygène dans le contexte des gaz d'échappement, la mesure de l'humidité de l'air revêt également une grande importance.

L'humidité indique par extension la teneur en eau des corps gazeux, liquides ou solides. Dans

1 Procédés d'analyse des gaz (sans tenir compte spécialement des méthodes hygrométriques).
(X) Applications à l'automobile.

Procédés physiques	Procédés physico-chimiques	Procédés chimiques
Conductivité thermique	Chaleur de réaction	Absorption sélective
Procédés magnétiques	Chaleur d'absorption	Absorption sélective et transformation chimique préalable
Absorption de rayonnements	Réaction chromatique caractéristique	
Chromatographie en phase gazeuse	Conductivité électrolytique	X
Procédés radioactifs	Procédés électrochimiques	X

Tableau 1

un sens plus restreint, il s'agit toutefois de la teneur en vapeur d'eau contenue dans un milieu gazeux – en particulier dans l'air.

Le refroidissement isobare d'un gaz humide fait que ce gaz atteint l'état de saturation à une température bien déterminée (appelée « point de rosée » τ).

Voici d'abord quelques définitions et relations spécifiques de l'hygrométrie (voir aussi la figure 1) :

m_w masse de l'eau
 m_s masse de l'eau à l'état de saturation
 m_{tr} masse du gaz sec

M_w masse en moles de l'eau
 M_{tr} masse moyenne en moles du gaz sec
 p pression totale du mélange gazeux
 p_w pression partielle de la vapeur d'eau

p_s pression de saturation (pression de vapeur de l'eau à la température du mélange)

Humidité absolue :

$$\chi = \frac{m_w}{m_{tr}} = \frac{M_w}{M_{tr}} \cdot \frac{p_w}{p-p_w} \text{ (en \%)}$$

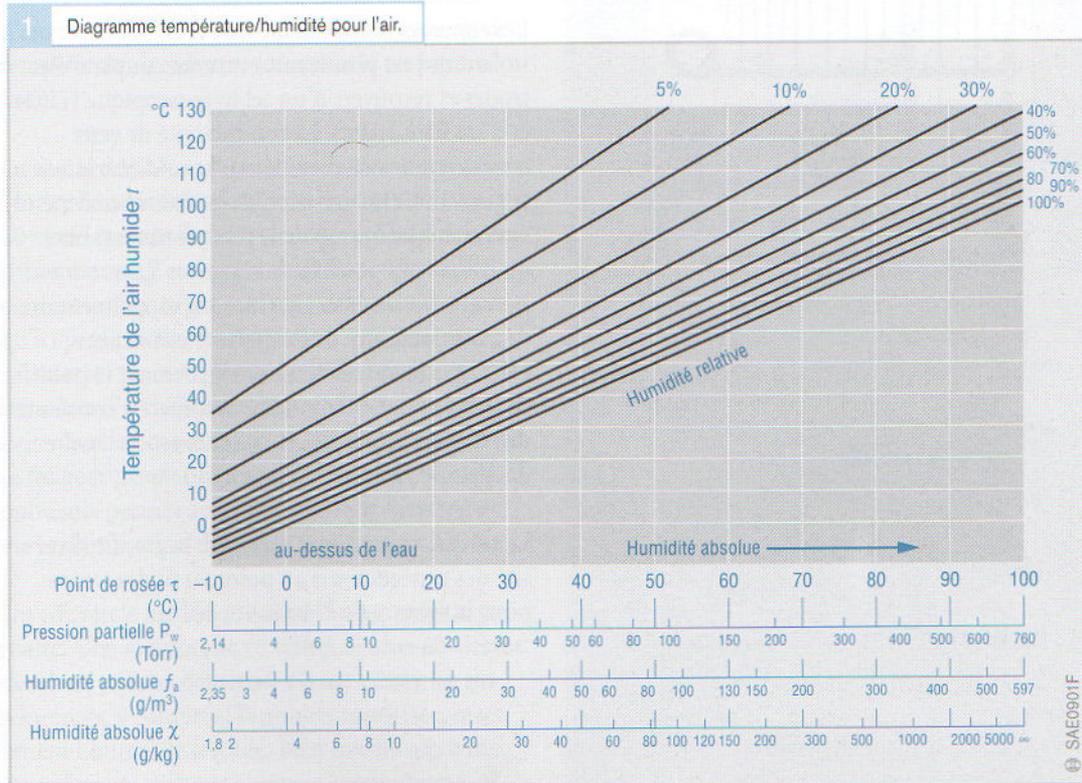
$$f_a = \frac{m_w}{V_{tr}} \text{ (rapportée au volume)}$$

Humidité relative :

$$\Phi = \frac{p_w}{p_s} \text{ (en \%)}$$

Seuls des capteurs résistifs ou capacitifs sont pratiquement envisageables pour satisfaire aux applications économiques du secteur de la consommation (p. ex. en automobile). Ils disposent de couches hygroscopiques qui assurent l'accumulation réversible d'eau en fonction de l'humidité relative et produisent ainsi la variation importante d'une résistance ou d'une capacité de type planaire.

Les capteurs d'humidité *capacitifs* exploitent une couche hygroscopique isolante (p. ex. Al_2O_3 ou un plastique polymère) qui constitue le diélectrique d'un condensateur et peut servir simulta-



2 Procédés hygrométriques. (X) Technologie intéressante.

Procédé	N° d'ordre		Appareil de mesure	Méthode de mesure
Saturation	1	X	Hygromètre à point de rosée	Méthodes directes (mesure de l'humidité absolue)
	2	X	Hygromètre à LiCl à point de rosée	
Evaporation	3	X	Psychromètre	
Absorption	4		Hygromètre volumétrique	
	5	X	Hygromètre électrolytique	
	6		Hygromètre à condensation	
Procédés énergétiques	7	X	Hygromètre à infrarouge	
	8		Hygromètre à micro-ondes	
	9		Hygromètre à décharge électr.	
	10		Hygromètre à diffusion	
Procédés hygroscopiques	11	X	Hygromètre électr. à film conducteur	Méthodes indirectes (mesure de l'humidité relative)
	12	X	Hygromètre à condenseur	
	13	X	Hygromètre à cheveu	
	14		Hygromètre bilame	
	15		Hygromètre chromatique	
	16		Hygromètre à quartz	
	17		Hygromètre gravimétrique	

Tableau 2

2 Plaquette sensible capacitive à électrodes en peigne.

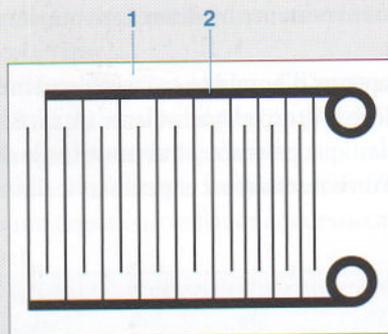


Figure 2

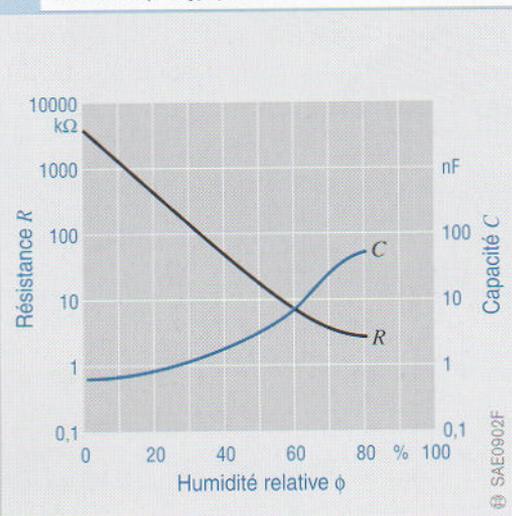
- 1 plaquette en plastique
- 2 électrodes en forme de peigne matriciées sur une feuille d'or

nément de plaquette-support. L'une des électrodes laisse passer la vapeur d'eau ou ces dernières présentent une structure en forme de peigne (figure 2). Plus l'humidité relative augmente, plus le diélectrique absorbe d'eau, ce qui se traduit par une forte augmentation de la capacité du capteur (constante diélectrique relative de l'eau : $\epsilon_{rW} \approx 81$, figure 3).

Les capteurs *résistifs* disposent d'un substrat isolant qui est positionné entre un couple d'électrodes et recouvert d'un sel hygroscopique (LiCl) et d'un liant (pâte). La conductivité de cette couche varie fortement avec l'humidité relative (figure 3). Cette variation de la résistance dépend également beaucoup de la température, si bien qu'il n'est pas possible de renoncer à une compensation adéquate. Une mesure supplémentaire de la température de l'air (par thermistance CTN) permet de déterminer également le point de rosée et donc l'humidité absolue. La constante de temps typique de ces capteurs est de l'ordre de 30 s.

Le tableau synoptique 2 montre la grande diversité des procédés mis au point au fil des temps pour la mesure de l'humidité de l'air.

3 Capteurs d'humidité résistif et capacitif (courbes caractéristiques typiques).



Capteurs de qualité d'air

Applications

Ce type de capteurs (figure 1) contrôle en permanence la qualité de l'air à l'entrée du climatiseur. Il réagit spécialement aux composants toxiques des gaz d'échappement que sont le CO (principalement des moteurs essence) et les NO_x (surtout des moteurs diesel).

Une autre fonction de ces capteurs est de prévenir l'embuage des vitres d'un véhicule. A cet effet, un capteur d'humidité détecte la teneur en vapeur d'eau contenue dans l'air.

Conception et fonctionnement

Les capteurs intégrés au calculateur de contrôle de la qualité de l'air (figure 1 et 2) sont constitués de résistances à couches épaisses à base d'oxyde d'étain. Dès que les matières à mesurer s'y déposent (de manière réversible), la résistance électrique des capteurs varie fortement dans une plage de mesure assez large (p. ex. entre 1 et 100 kΩ). Les résistances de ces sondes se trouvent sur un substrat céramique commun, dont la face dorsale est réchauffée par un thermocouple pour atteindre une température de fonctionnement d'environ 330 °C. En raison de ce haut niveau de température, le substrat est contacté en porte à faux.

La sonde de CO mesure des concentrations de l'ordre de 10 à 100 ppm (parties par million ou 10⁻⁶) et la sonde de NO_x des concentrations comprises entre 0,5 et 5 ppm. Dès que le niveau de concentration de gaz toxiques est trop élevé (jusqu'ici presque 100 fois supérieur à l'air propre), le calculateur de contrôle de la qualité de l'air ferme les volets d'arrivée d'air frais. Cette fonctionnalité évite donc au conducteur de respirer ces gaz et de se fatiguer prématurément. L'écartement de ces polluants permet aussi de prolonger la durée de vie et d'utilisation des filtres à charbon actif.

Un couvercle métallique offre une protection primaire. Une membrane en téflon tendue au-dessus des deux cellules détectrices laisse passer les gaz à mesurer, y compris l'humidité vaporisée, mais retient l'humidité liquide. Bien que les gaz à mesurer doivent diffuser à travers la membrane en

téflon, le temps de réaction des capteurs est malgré tout de quelques millisecondes.

Les calculateurs les plus récents de contrôle de la qualité de l'air possèdent aussi un capteur d'humidité (figure 3). Son signal ne sert pas uniquement à la mesure de la température de l'habitacle via une thermistance CTN, mais aussi au calcul du point de rosée qui influence le phénomène d'embuage des vitres du véhicule.

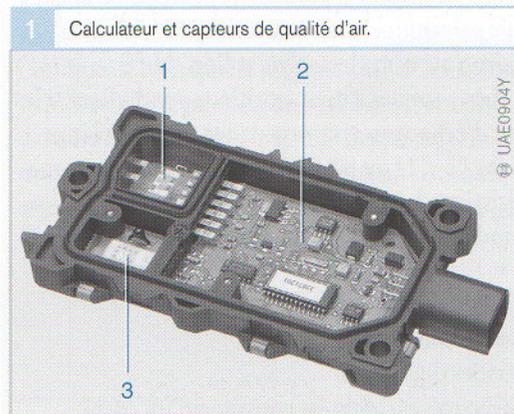


Figure 1

- 1 cellule de mesure NO_x/CO
- 2 électronique d'exploitation
- 3 capteur d'humidité

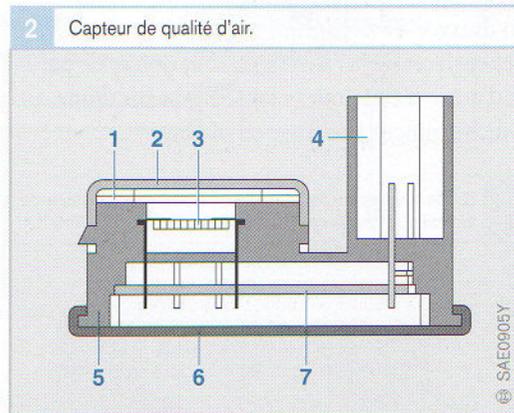


Figure 2

- 1 membrane en téflon
- 2 calotte (perméable aux gaz)
- 3 cellule de mesure NO_x/CO
- 4 connecteur
- 5 boîtier
- 6 couvercle et joint
- 7 carte à circuit imprimé

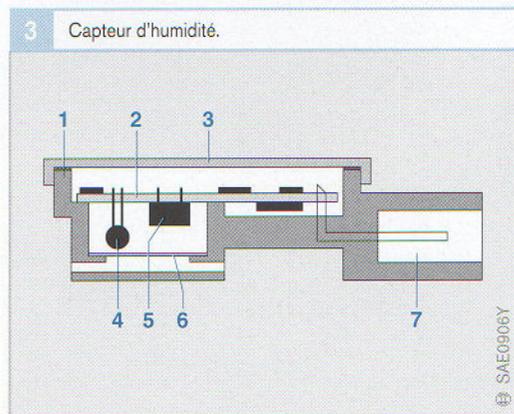


Figure 3

- 1 boîtier
- 2 carte à circuit imprimé
- 3 couvercle et joint
- 4 capteur de température
- 5 cellule hygrométrique
- 6 membrane en téflon
- 7 connecteur

Sondes à oxygène à deux positions

Applications

Les sondes « lambda » de ce type sont utilisées sur les moteurs à essence dotés d'une régulation de richesse à deux positions. Elles font saillie dans la tuyauterie d'échappement et assurent la détection simultanée du flux de gaz d'échappement rejeté par les différents cylindres. Leur mode de fonctionnement repose sur le principe de la cellule galvanique à concentration d'oxygène en liaison avec un électrolyte solide.

Les « sondes à deux positions » indiquent si le gaz d'échappement proviennent d'un mélange riche ($\lambda < 1$) ou pauvre ($\lambda > 1$). La courbe caractéristique à variation brusque (saut) de ces sondes permet la régulation du mélange sur $\lambda = 1$ (figure 1).

Conception

Sondes digitiformes

L'électrolyte solide est constitué d'un corps céramique fermé d'un côté, étanche aux gaz, en dioxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium. Les surfaces de la céramique sont dotées de part et d'autre d'électrodes réalisées à partir d'une couche mince et poreuse en platine.

L'électrode en platine côté externe, qui fait saillie dans la tuyauterie d'échappement, joue le rôle d'un petit catalyseur : les gaz d'échappement y font l'objet d'un post-traitement catalytique et atteignent un équilibre stœchiométrique ($\lambda = 1$). La face exposée aux gaz d'échappement est également recouverte d'une couche poreuse en céramique (type spinelle) assurant une protection contre l'encrassement. Un tube métallique à plusieurs ouïes protège le corps en céramique contre les contraintes mécaniques (impacts) et les chocs thermiques. L'espace interne ouvert, du côté opposé aux gaz d'échappement, communique avec l'air extérieur qui constitue le gaz de référence (figure 2).

Sonde digitiforme non chauffée LS21

Un tube de protection en céramique et une rondelle élastique maintiennent l'élément céramique digitiforme dans le culot de la sonde et assurent son étanchéité (figure 3, structure semblable à celle d'une sonde « lambda » chauffée, figure 4, mais sans élément chauffant). Un talon de contact placé entre le tube de protection et la céramique active réalise la liaison électrique entre l'électrode interne et le câble de connexion.

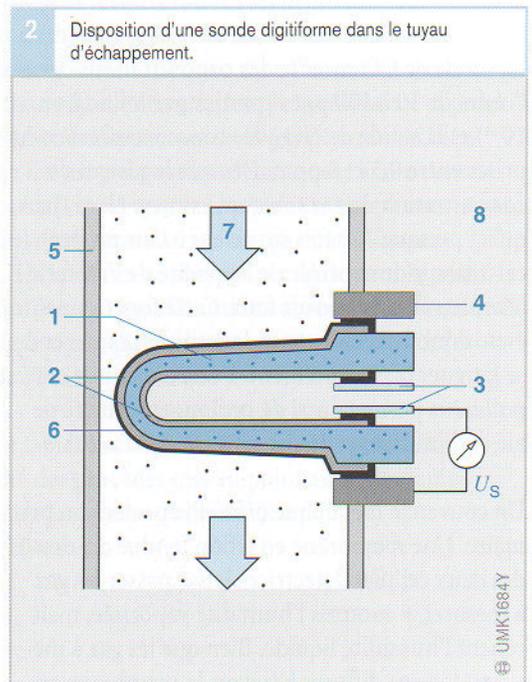
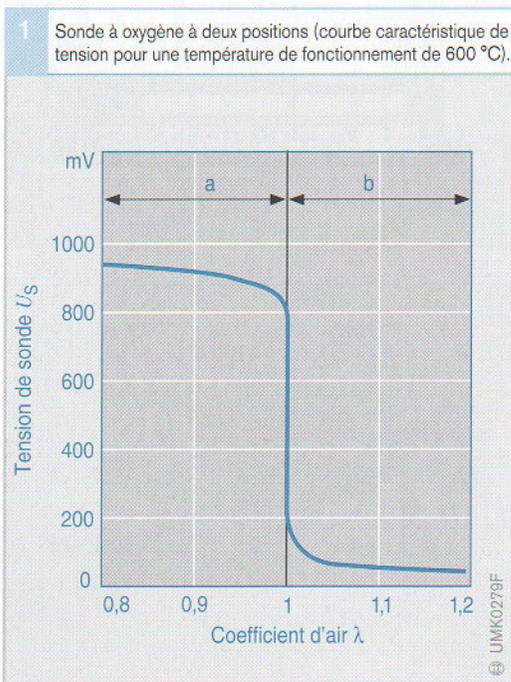
Une bague d'étanchéité métallique relie l'électrode externe au culot de la sonde. Une douille de

Figure 1

- a mélange riche (déficit d'air)
- b mélange pauvre (excédent d'air)

Figure 2

- 1 céramique spéciale
- 2 électrodes
- 3 contacts
- 4 point de contact du boîtier
- 5 tuyau d'échappement
- 6 couche de protection en céramique (poreuse)
- 7 gaz d'échappement
- 8 air extérieur
- U_S tension de sonde



protection métallique, qui sert simultanément de logement à la rondelle élastique, assure le positionnement et la fixation de toute la structure interne de la sonde. Elle protège aussi l'intérieur de la sonde contre l'encrassement. Le câble de connexion est serti sur le talon de contact dépassant à l'extérieur ; il est protégé contre l'humidité et les contraintes mécaniques par un capuchon stable à la température.

Afin de ne pas exposer la céramique aux résidus de combustion contenus dans les gaz d'échappement, le culot de la sonde est muni, côté émissions, d'un tube de protection de forme parfaitement étudiée. Les ouïes de ce tube sont dessinées de manière à garantir une protection efficace contre de fortes contraintes chimiques et thermiques.

Sonde digitiforme chauffée LSH24

Ce type de sonde (figure 4) est dotée d'un élément chauffant. La température de la céramique est déterminée par un réchauffeur électrique en cas de faible charge du moteur (c.-à-d. à basse température des émissions) ou par le niveau de température des gaz d'échappement en cas de charge élevée. La sonde digitiforme chauffée peut être implantée à une distance assez importante du moteur, si bien qu'un fonctionnement continu à pleine charge ne pose aucun problème. Le réchauffeur induit le réchauffement rapide de la céramique, si bien que la disponibilité de fonctionnement de la régulation de richesse est atteinte dans les 20 à 30 s qui suivent le démarrage du moteur. Ces avantages constituent un concours essentiel à la limitation des émissions d'échappement et à la stabilité de leur composition.

3 Sonde digitiforme non chauffée à oxygène LS21.

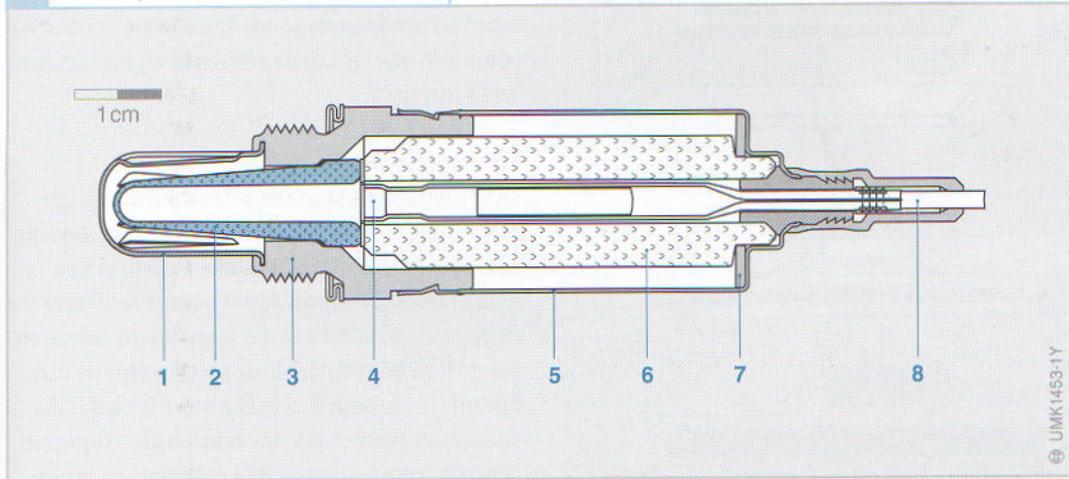


Figure 3

- 1 tube de protection
- 2 céramique active
- 3 culot
- 4 talon de contact
- 5 chemise protectrice
- 6 tube-support en céramique
- 7 rondelle élastique
- 8 câble de connexion

4 Sonde digitiforme chauffée à oxygène LSH24.

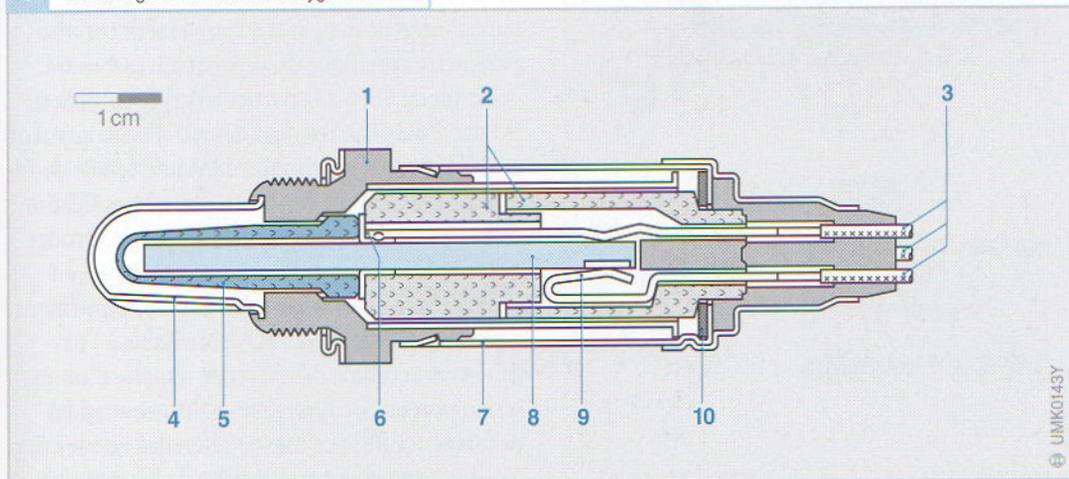


Figure 4

- 1 culot
- 2 tube-support en céramique
- 3 câble de connexion
- 4 tube de protection avec ouïes
- 5 céramique active
- 6 talon de contact
- 7 chemise protectrice
- 8 élément chauffant
- 9 connexions de l'élément chauffant
- 10 rondelle élastique

Sondes planaires à oxygène

Le mode de fonctionnement des sondes planaires à saut de tension pour $\lambda = 1$ correspond à celui des sondes digitiformes chauffées. L'électrolyte solide est toutefois constitué par une superposition de plusieurs feuilles céramique laminées (figure 5). Un tube à double paroi protège l'élec-

trolyte contre les influences thermiques et mécaniques.

La céramique planaire (qui intègre la cellule de mesure et le réchauffeur) a la forme d'une plaquette longiligne de section rectangulaire. La surface de la cellule de mesure est recouverte d'une couche microporeuse en métal précieux. Du côté gaz d'échappement, l'électrode en métal précieux est recouverte d'une couche de protection poreuse en céramique. Cette dernière empêche les détériorations par l'effet d'érosion dû aux résidus de combustion contenus dans les gaz d'échappement. Le réchauffeur, qui est constitué d'un serpentín isolé à base de métal précieux et intégré dans la plaquette en céramique, assure un réchauffement rapide de la sonde.

Tandis que la cellule de référence à l'intérieur de la sonde LSF4 (figures 6a et 7) communique avec l'air ambiant, la sonde LSF8 (figures 6b et 8) comporte une cellule de référence O₂ hermétique vers l'extérieur.

Figure 5
 1 couche de protection poreuse
 2 électrode externe
 3 feuille sensible
 4 électrode interne
 5 feuille à canal d'air de référence
 6 couche isolante
 7 réchauffeur
 8 feuille de réchauffeur
 9 contacts de connexion

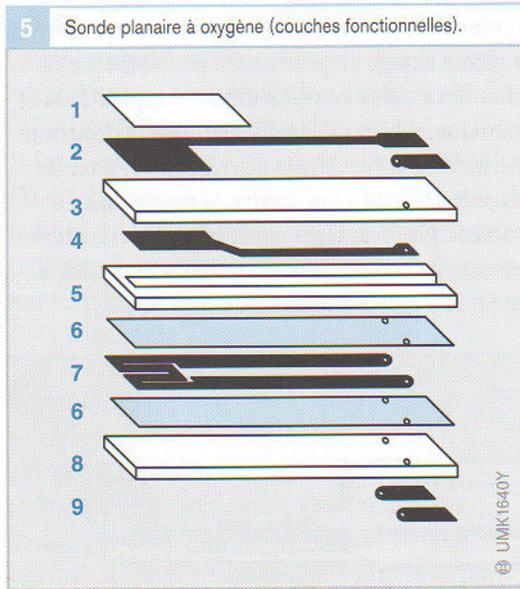
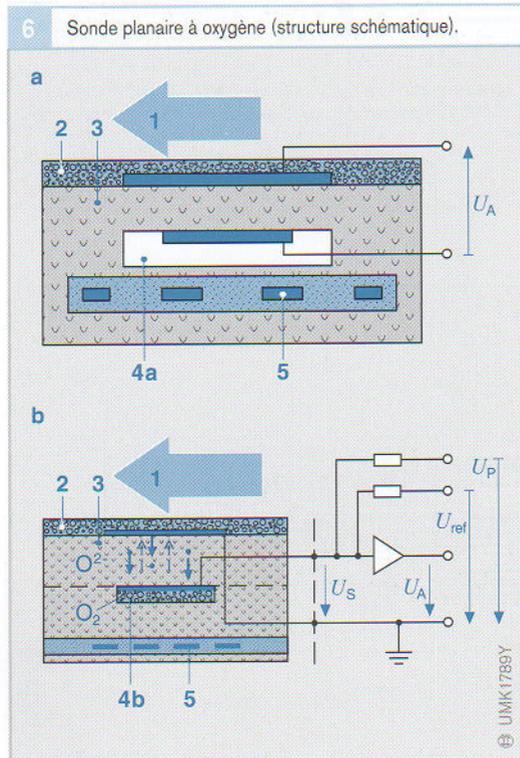


Figure 6
 a version LSF4
 b version LSF8
 1 gaz d'échappement
 2 couche de protection en céramique poreuse
 3 cellule de mesure à couche microporeuse de métal précieux
 4a canal d'air de référence
 4b cellule de référence pour O₂
 5 réchauffeur
 U_A tension de sortie
 U_S tension de sonde
 U_P tension de pompage
 U_{ref} tension de référence



Fonctionnement

La céramique de la sonde à deux positions, qui fonctionne suivant le principe de Nernst, devient conductrice des ions d'oxygène à partir d'une température d'environ 350 °C. Un reste d'oxygène demeurant dans les gaz d'échappement même en cas de fonctionnement avec un excédent de carburant (p. ex. pour $\lambda = 0,95$ encore 0,2 à 0,3 du volume en pour cent), une tension électrique est générée entre les deux surfaces limites en raison du taux d'oxygène différent sur chacun des côtés de la sonde. Il est ainsi possible de considérer le taux d'oxygène des gaz d'échappement comme paramètre spécifique du rapport air/carburant.

La sonde LSF8 a la particularité de comparer le taux d'oxygène résiduel des gaz d'échappement avec l'oxygène emprisonné dans une cellule de référence hermétique vers l'extérieur. L'application d'une tension de pompage U_P à deux électrodes génère un courant de 20 µA qui « pompe » en permanence de l'oxygène des gaz d'échappement à travers la céramique ZrO₂ perméable à l'oxygène vers la cellule de référence remplie d'un matériau poreux. De l'oxygène se diffuse aussi en permanence de la cellule de référence vers le côté gaz d'échappement en fonction de la teneur en

oxygène qui y règne. La tension de sonde momentanée résulte de cette alternance.

La tension fournie par la sonde en fonction du taux d'oxygène des gaz d'échappement atteint 800 à 1000 mV pour un mélange riche ($\lambda < 1$) et seulement 100 mV pour un mélange pauvre ($\lambda > 1$). La transition de la zone riche à la zone pauvre a lieu pour 450 à 500 mV.

La température du corps céramique influence aussi la conductivité des ions d'oxygène et, par conséquent, l'évolution de la tension fournie en fonction du coefficient d'air λ (les valeurs mentionnées à la figure 1 sont valables pour 600 °C environ). Par ailleurs, le temps de réponse pour une variation de tension en cas de changement de la composition du mélange dépend beaucoup de la température.

Si ces temps de réponse atteignent quelques secondes lorsque la céramique se trouve à une température inférieure à 350 °C, la réaction de la sonde intervient au bout d'un temps inférieur à 50 ms pour une température optimale de fonctionnement de 600 °C. C'est pour cette raison que la régulation de richesse est désactivée après le démarrage du moteur jusqu'à l'obtention de la température minimale de fonctionnement de l'ordre de 350 °C. Le moteur fonctionne alors en mode commandé.

Des températures trop élevées raccourcissent la durée de vie. Le point de montage de la sonde à oxygène doit être choisi de sorte que le seuil de 850 °C ne soit pas dépassé en fonctionnement longue durée à pleine charge ; une limite maximale de 930 °C est admissible pour un court laps de temps.

7 Sonde planaire à oxygène LSF4.

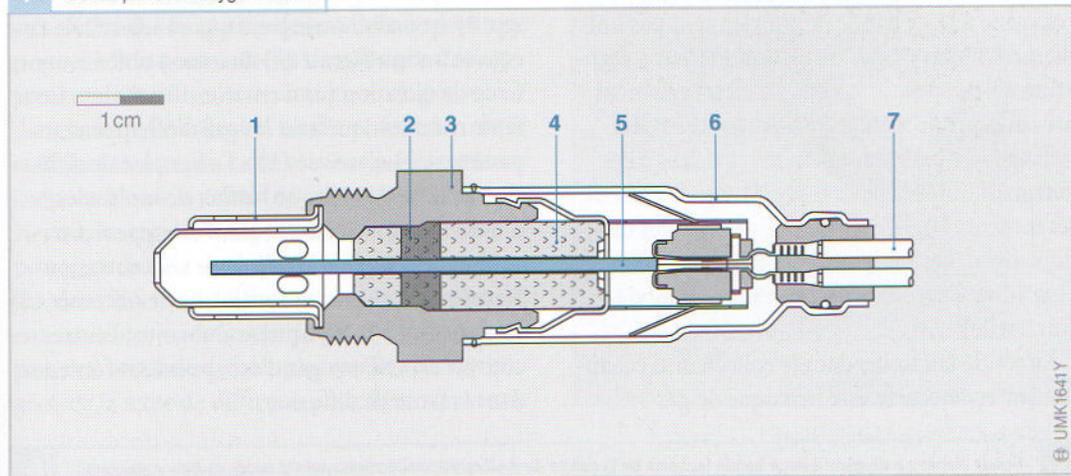


Figure 7

- 1 tube de protection
- 2 bague d'étanchéité en céramique
- 3 culot
- 4 tube-support en céramique
- 5 cellule de mesure planaire
- 6 chemise protectrice
- 7 câble de connexion

8 Sonde planaire à oxygène LSF8.

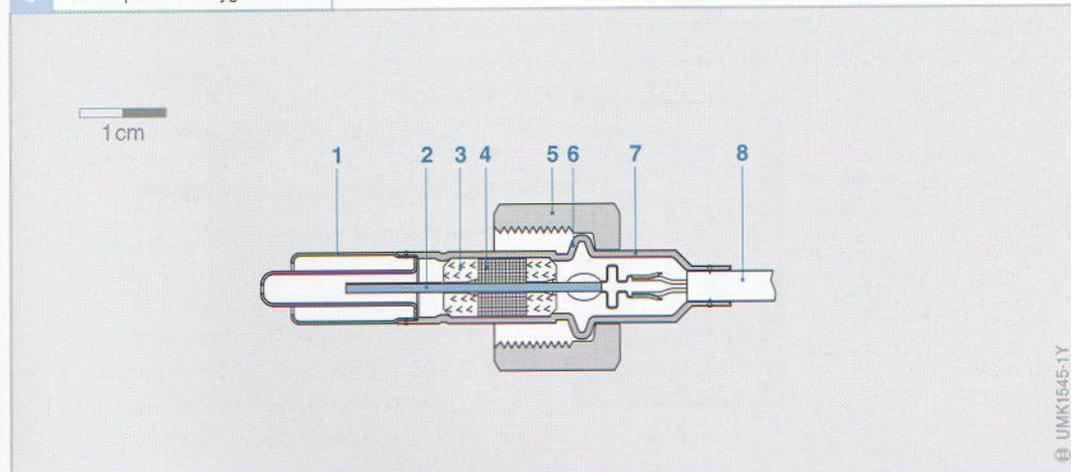


Figure 8

- 1 tube de protection
- 2 cellule de mesure planaire
- 3 douille isolante
- 4 bague d'étanchéité en céramique
- 5 écrou-raccord
- 6 bride d'étanchéité
- 7 culot
- 8 chemise métallique

Sonde planaire à oxygène à large bande LSU4

Applications

La sonde planaire à large bande permet de déterminer la concentration d'oxygène dans les gaz d'échappement et d'évaluer ainsi le rapport air/carburant au niveau de la chambre de combustion. Le coefficient d'air λ matérialise ce rapport air/carburant. Les sondes « lambda » à large bande effectuent des mesures précises non seulement au point stœchiométrique correspondant à $\lambda = 1$, mais aussi dans les plages de mélange pauvre ($\lambda > 1$) et riche ($\lambda < 1$). Elles émettent un signal électrique net et constant dans la plage $0,7 < \lambda < \infty$ ($\infty =$ air contenant 21 % d'O₂) (figure 2).

Compte tenu de ces caractéristiques, les sondes à oxygène à large bande ne conviennent pas uniquement aux systèmes de gestion moteur à régulation à deux positions ($\lambda = 1$), mais également aux concepts de régulation qui autorisent des mélanges air-carburant pauvres et riches. Elles sont aussi utilisées pour la régulation de richesse des moteurs essence à mélange pauvre, des moteurs diesel, des moteurs à gaz et des chaudières à gaz (d'où l'abréviation LSU : sonde lambda universelle).

La sonde fait saillie dans le collecteur d'échappement et détecte le flux massique de gaz

d'échappement de tous les cylindres. Certains systèmes disposent de plusieurs sondes pour une régulation plus précise, par exemple en amont et en aval du pot catalytique ainsi que dans les différents canaux d'échappement (rangées de cylindres).

Conception

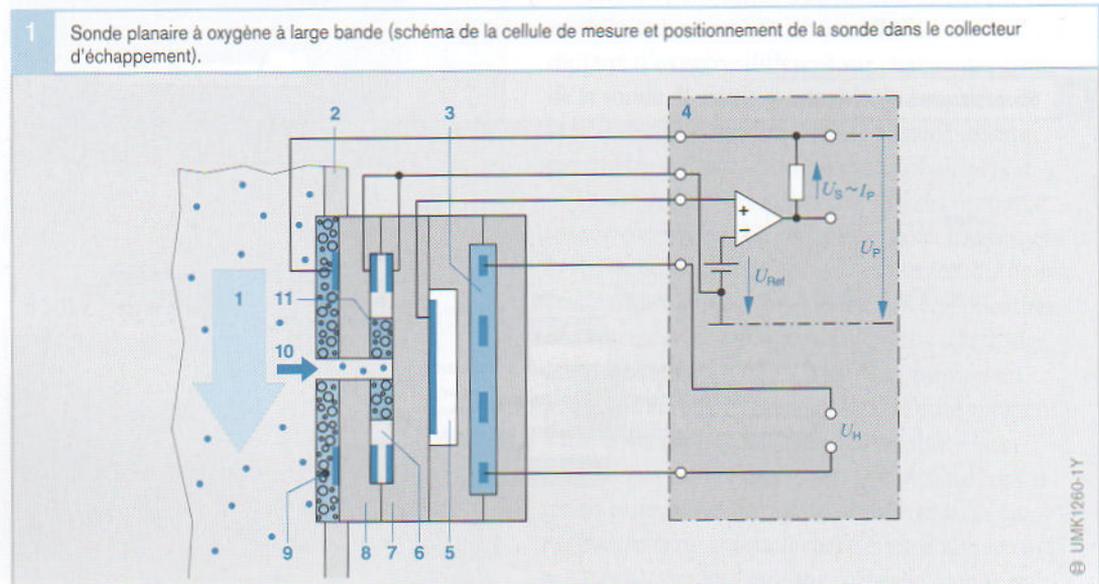
La sonde à oxygène à large bande LSU4 (figure 3) est une sonde planaire bicellulaire à courant limite. Sa cellule de détection (figure 1) est constituée d'une céramique à base de dioxyde de zirconium ou zircone (ZrO₂). Il s'agit de la combinaison d'une cellule de concentration Nernst (élément sensible de fonction identique à celle d'une sonde à deux positions de régulation) et d'une cellule de pompage qui transporte les ions oxygène.

La cellule de pompage d'oxygène (figure 1, rep. 8) est positionnée par rapport à la cellule de concentration Nernst (7) de sorte à obtenir une fente de diffusion (6) d'environ 10 à 50 μm . Cette fente communique avec les gaz d'échappement par un canal d'arrivée (10). La barrière de diffusion poreuse (11) limite l'afflux de molécules d'oxygène provenant des gaz d'échappement.

L'un des côtés de la cellule de concentration Nernst est relié par un canal d'air de référence (5) et un orifice à l'atmosphère ambiante ; l'autre côté est exposé aux gaz d'échappement contenus dans la fente de diffusion.

Figure 1

- 1 gaz d'échappement
 - 2 collecteur d'échappement
 - 3 réchauffeur
 - 4 électronique de régulation
 - 5 cellule et canal d'air de référence
 - 6 fente de diffusion
 - 7 cellule de concentration Nernst
 - 8 cellule de pompage d'oxygène avec électrodes interne et externe
 - 9 couche protectrice poreuse
 - 10 trou d'entrée des gaz
 - 11 barrière de diffusion poreuse
- I_p courant de pompage
 U_p tension de pompage
 U_H tension de chauffage
 U_{Ref} tension de référence (450 mV, correspond à $\lambda = 1$)
 U_S tension de sonde



La sonde n'émet un signal exploitable qu'à une température de fonctionnement d'au moins 600 à 800 °C. Afin que cette température soit atteinte rapidement, la sonde est équipée d'un réchauffeur intégré (3).

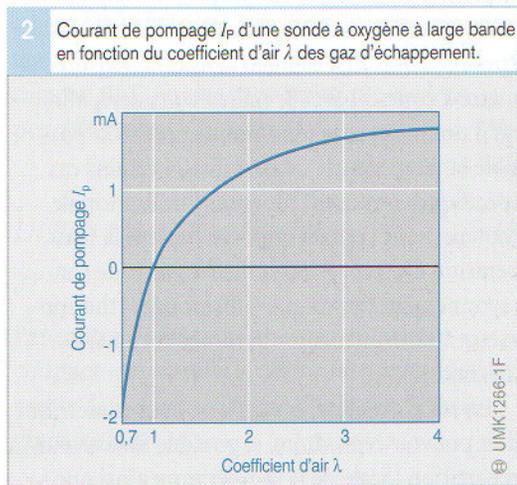
Fonctionnement

Les gaz d'échappement traversent le petit trou d'entrée de la cellule de pompage et atteignent la chambre de mesure (fente de diffusion) de la cellule de concentration Nernst. Cette dernière assure le réglage du coefficient d'air λ en comparant le gaz admis dans la fente de diffusion avec l'air ambiant qui se trouve dans le canal d'air de référence.

L'ensemble du processus se déroule de la façon suivante :

L'application d'une tension de pompage U_P aux électrodes de platine de la cellule de pompage permet à l'oxygène contenu dans les gaz d'échappement de traverser la céramique et de pénétrer dans la fente de diffusion ou d'en sortir. Un circuit électronique du calculateur régule, avec la coopération de la cellule de concentration Nernst, la tension U_P appliquée à la cellule de pompage de telle sorte que la composition des gaz dans la fente de diffusion reste sur la valeur constante de $\lambda = 1$. En cas de gaz d'échappement pauvres, la cellule de pompage prélève de l'oxygène de la fente de diffusion pour l'évacuer vers

l'extérieur (courant de pompage positif). Par contre, en cas de gaz riches, de l'oxygène (issu de la décomposition de CO_2 et de H_2O) est dirigé vers la fente de diffusion (courant de pompage négatif). Aucun transfert d'oxygène n'intervient lorsque $\lambda = 1$. Le courant de pompage est nul. Le courant de pompage est proportionnel à la concentration d'oxygène dans les gaz d'échappement et constitue donc un paramètre spécifique du coefficient d'air λ (figure 2).



3 Sonde planaire à oxygène à large bande LSU4 (coupe).

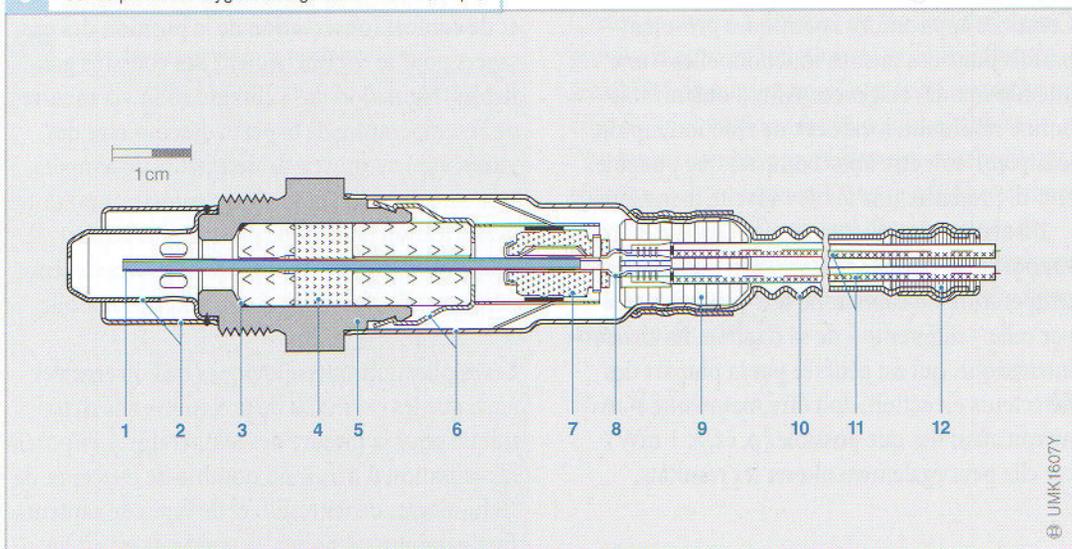


Figure 3

- 1 cellule de mesure (combinaison d'une cellule de concentration Nernst et d'une cellule de pompage d'oxygène)
- 2 tube de protection double
- 3 joint
- 4 garniture d'étanchéité
- 5 culot
- 6 chemise protectrice
- 7 support de contacts
- 8 clip de contacts
- 9 passe-fils en PTFE (téflon)
- 10 tube souple profilé en PTFE
- 11 cinq fils de connexion
- 12 joint

Capteurs de température

Grandeurs de mesure

La température est une grandeur intensive, qui caractérise l'état énergétique d'un milieu et dépend de l'endroit et du temps :

$$T = T(x, y, z, t) \quad (1)$$

où x, y, z représentent les coordonnées spatiales, t le temps, T étant définie par l'échelle Celsius ou l'échelle de Kelvin.

La température de milieux gazeux ou liquides peut être mesurée généralement sans problème en n'importe quel point local. La mesure de la température de corps solides se limite le plus souvent à leur surface. La plupart des capteurs de température utilisés nécessitent un contact étroit et direct de l'élément sensible (thermomètre à contact) avec le milieu considéré, afin qu'il prenne avec la plus grande précision possible la température de ce milieu. Certains cas spécifiques imposent toutefois l'utilisation de capteurs sans contact qui déterminent la température d'un corps ou milieu à partir de son rayonnement thermique (infrarouge) (thermomètre à rayonnement = pyromètre, caméra thermique).

En règle générale, un capteur thermométrique doit pouvoir reproduire, si possible sans erreur, la répartition locale de la température ainsi que sa variation en fonction du temps.

Certaines applications spécifiques prévoient – parfois pour des raisons fonctionnelles – une atténuation des exigences. Afin d'obtenir une bonne résolution locale et une réaction rapide, le capteur doit être aussi compact que possible, c.-à-d. présenter une faible capacité thermique.

L'isolation thermique entre le capteur et son support doit s'avérer efficace, afin que la propre température du capteur ne soit pas influencée par celle – différente – de sa fixation. La chaleur intrinsèque, qui est générée par la plupart des détecteurs en action, doit être maintenue à un niveau aussi bas que possible (p. ex. < 1 mW) car elle peut également altérer les résultats.

La constante de temps τ matérialise le comportement dynamique d'un capteur de température. Elle indique le temps que nécessite le détecteur pour arriver, par exemple, à 63, 90 ou 99 % de son affichage final en cas de saut de température. Ce temps ne dépend pas seulement de la capacité thermique du capteur, mais surtout aussi du coefficient d'échange thermique avec le milieu étudié. Plus il est grand, plus l'indication de la valeur finale est rapide. De par nature, ce coefficient est plus important pour les liquides que pour les milieux gazeux. Il convient également de tenir compte du fait que le coefficient d'échange thermique dépend beaucoup d'une éventuelle vitesse d'écoulement v du milieu considéré (voir « Débitmètre massique d'air à film chaud ». Ce coefficient augmente environ avec \sqrt{v} . La constante de temps d'un capteur de température devrait donc toujours être indiquée en relation avec une vitesse d'écoulement bien déterminée d'un milieu bien défini.

Dans l'automobile, la mesure des températures s'effectue presque toujours au moyen de thermomètres à contact constitués de thermistances à coefficient de température positif (CTP) ou négatif (CTN). La conversion de la résistance électrique en une tension analogique est le plus souvent réalisée par un montage de type diviseur de tension (effet linéarisateur), avec une seconde résistance indépendante de la température ou à courbe de température inverse. Depuis l'avènement des microsystèmes, les constructeurs réalisent la plupart des fonctions de sécurité passive et de confort (observation de la position des passagers pour le déclenchement des coussins gonflables, régulation de la climatisation via mesure de la température de la peau, désembuage des vitres, etc.) au moyen de détecteurs de température sans contact (procédés pyrométriques) dont la fabrication devient de plus en plus économique. Le tableau 1 indique les mesures de température spécifiques d'un véhicule automobile.

Les applications météorologiques très diversifiées ainsi que les exigences de précision et de dynamique pour la mesure des températures imposent la réalisation d'un grand nombre de concepts, de technologies de détection et de types de capteurs. En de nombreux points, la température est aussi

1 Températures caractéristiques d'un véhicule automobile.	
Point de mesure	Plage °C
Air d'admission/de suralimentation	-40 ... 170
Air ambiant	-40 ... 60
Habitacle	-20 ... 80
Ventilation/chauffage	-20 ... 60
Evaporateur (climatiseur)	-10 ... 50
Eau de refroidissement	-40 ... 130
Huile moteur	-40 ... 170
Batterie	-40 ... 100
Carburant	-40 ... 120
Air des pneumatiques	-40 ... 120
Gaz d'échappement	100 ... 1000
Etrier de frein	-40 ... 2000

mesurée en tant que grandeur auxiliaire, afin de compenser ses effets indésirables ou de l'exclure des sources de défaillance potentielles.

Principes de mesure

Capteurs à contact

Quasiment tous les phénomènes physiques dépendant de la température, les possibilités de mesure de la température sont donc très nombreuses. Il convient toutefois de donner la préférence aux méthodes qui exploitent un effet de température prononcé et dominant, et qui suivent, si possible, une courbe caractéristique linéaire. Par ailleurs, les éléments de mesure doivent être adaptés à une fabrication économique en grandes séries, présenter une reproductibilité satisfaisante et une bonne stabilité au vieillisse-

ment. Compte tenu de ces critères, les technologies de détection suivantes se sont mises en relief et ont été également introduites dans l'automobile :

Capteurs résistifs

Les résistances électriques, qui constituent des éléments bipolaires dépendant de la température, sont parfaitement adaptées à la mesure des températures. Elles se présentent sous forme de fils enroulés, de céramiques frittées, de feuilles, de substrats à couches minces ou épaisses ainsi que de monocristaux. La conversion en un signal de tension analogique est habituellement réalisée par l'adjonction d'une résistance fixe R_V constituant ainsi un diviseur de tension ou par l'apport d'un courant indépendant de la charge (intensité « incrustée ») (figure 1). Le circuit à diviseur de tension convertit la caractéristique initiale du capteur $R(T)$ en une caractéristique quelque peu différente $U(T)$, à savoir :

$$U(T) = U_0 \cdot \frac{R(T)}{R(T) + R_V} \tag{2}$$

Par contre, l'alimentation sous un courant constant « incrusté » I_0 donne une reproduction exacte de la caractéristique du dipôle de résistance, c.-à-d. :

$$U(T) = I_0 \cdot R(T) \tag{3}$$

Certes, le circuit à diviseur de tension diminue plus ou moins, en fonction de sa conception, la sensibilité de mesure, mais exerce en revanche un effet de linéarisation (souvent souhaitable) sur l'évolution coudée progressive des courbes caractéristiques de résistance. Dans ce cas, la résistance complémentaire est souvent dimensionnée de manière à correspondre à la résistance de mesure pour une température de référence T_0 bien déterminée (p. ex. 20 °C) :

$$R_V \approx R(T_0) \tag{4}$$

Tableau 1

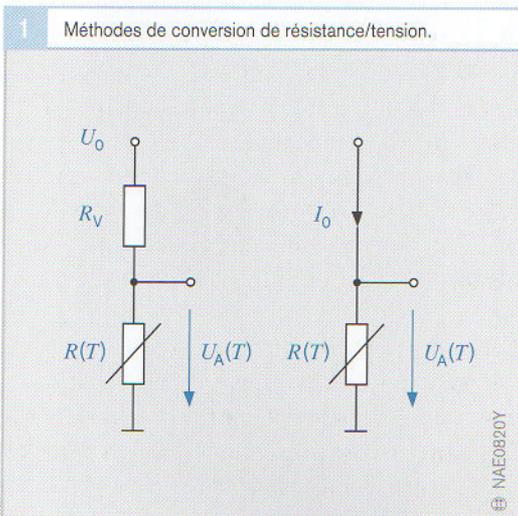


Figure 1

- I_0 courant d'alimentation
- U_0 tension d'alimentation
- R_V résistance série indépendante de la température
- $R(T)$ résistance de mesure dépendante de la température
- $U_A(T)$ tension de sortie

Si la précision de fabrication n'est pas suffisante, l'utilisation d'une résistance parallèle équilibrable R_p et d'une résistance série R_s permet à un capteur résistif d'atteindre ses paramètres de consigne, qu'il s'agisse de sa valeur de résistance (à une température de référence) ou de son coefficient de température (TK) (figure 2). Bien entendu, l'adjonction de résistances fixes se concrétise, ici aussi, par une diminution du coefficient de température et une légère variation de la caractéristique.

Thermistances en céramique frittée CTN

En raison de leurs très bonnes propriétés métrologiques et de leur fabrication économique, les résistances semiconductrices à base d'oxydes de métaux lourds ou de cristaux mixtes oxydés bénéficient d'une haute fréquence d'utilisation. Elles sont conditionnées sous forme de perles ou disques frittés (figure 3) et présentent une structure polycristalline. Leur courbe caractéristique de température à forte pente est à l'origine de leurs dénominations « thermistance » ou « thermistor ». Leur caractéristique peut être définie,

avec une bonne approximation, à l'aide de l'équation exponentielle suivante :

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \tag{5}$$

où $R_0 = R(T_0)$,
 $B = 2000 \text{ à } 5000 \text{ K} = \text{const}$,
 T température absolue

La pente de la courbe caractéristique (TK) ou le pourcentage de variation de la résistance en fonction de la température dépend beaucoup du point de travail, c.-à-d. que ce paramètre ne peut être défini que ponctuellement :

$$TK = - B/T^2 \tag{6}$$

Plus la température augmente, plus la pente de la caractéristique diminue. La valeur de résistance varie elle-même souvent sur une étendue couvrant 4 à 5 puissances de dix, p. ex. sur une plage type allant de quelques centaines de kilo-ohms (kΩ) à plusieurs dizaines d'ohms (Ω). La forte

Figure 2

- a capteur résistif
- b courbes caractéristiques
- 1 contacts auxiliaires
- 2 pont
- R_{Ni} résistance à couche de nickel
- $R_{ges}(T)$ résistance totale rapportée à la température T
- R_p résistance parallèle étalonnable
- R_s résistance série étalonnable

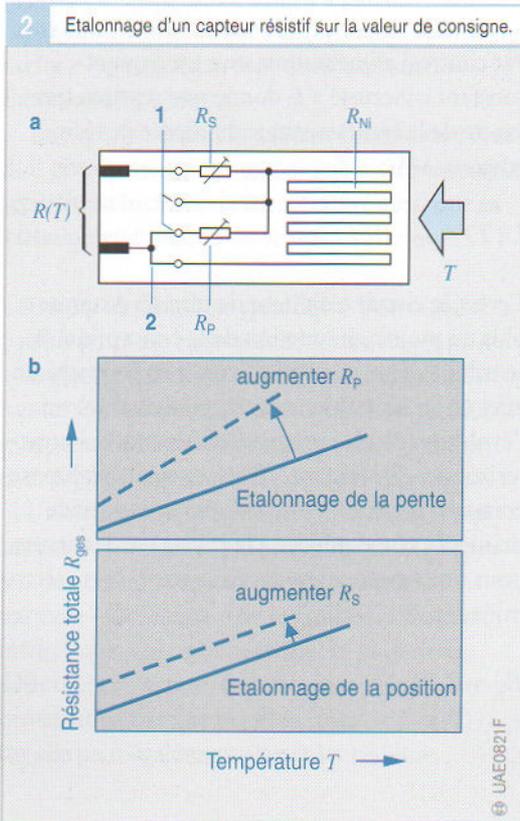
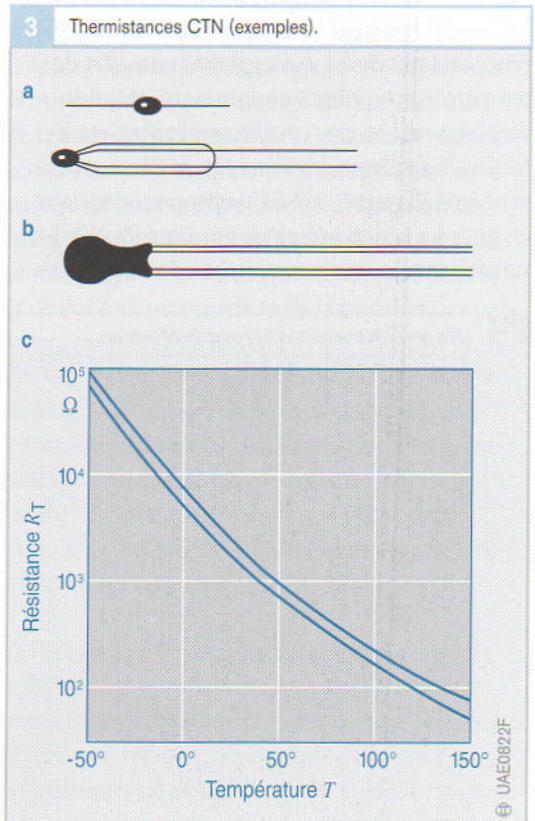


Figure 3

- a en forme de perle
- b en forme de disque
- c courbe caractéristique et limites de dispersion



UAE0821F

UAE0822F

sensibilité thermique restreint l'étendue de mesure à environ 200 K. Leur plage de fonctionnement s'étend en revanche de -40 à 850 °C environ. Des tolérances plus étroites de l'ordre de ±0,5 K en un point de référence bien défini peuvent être obtenues soit par sélection rigoureuse, soit par un procédé de rectification sous huile, ce qui se répercute évidemment sur les coûts de fabrication. Entre-temps, on a réussi à améliorer nettement la stabilité de ces capteurs au vieillissement, si bien que les étroites tolérances indiquées sont effectivement respectées sur toute leur durée d'utilisation.

Résistances métalliques en couches minces/épaisses CTP

Logées sur un substrat avec deux autres résistances d'étalonnage insensibles à la température, les résistances métalliques en couches minces offrent une très grande précision. Leur mode de

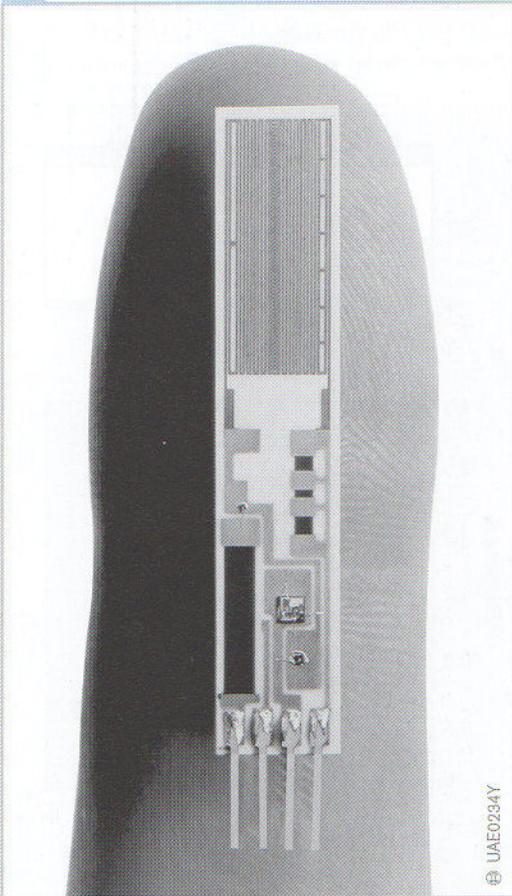
fabrication et de finition (ajustage individuel au laser) réduit les marges de tolérance et garantit une excellente stabilité dans le temps (figure 4). L'application de la technique de dépôt de couches permet d'adapter le matériau support (céramique, verre, film plastique) et les couches superficielles (plastique moulé ou vernis, film soudé, glacié de verre ou de céramique) aux spécificités de mesure et donc d'assurer une bonne protection contre le fluide de mesure. Moins sensibles à la température que les thermistances céramiques à base d'oxydes, les thermistances à couches métalliques présentent en revanche une meilleure linéarité et une meilleure reproductibilité. L'équation suivante sert de base au calcul de ce type de capteurs :

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T^2 + ..) \tag{7}$$

où $\Delta T = T - T_0$ et
 $T_0 = 20\text{ °C}$ (température de référence),
 α coefficient de température linéaire (TK),
 β coefficient de température quadratique.

Certes, le coefficient β des métaux est généralement très faible, mais ne doit cependant pas être négligé. En général, la sensibilité de mesure de ces capteurs est caractérisée par un coefficient de température moyen, le « TK 100 », qui correspond à la pente moyenne de la courbe caractéristique entre 0 et 100 °C (tableau 2 et figure 5).

4 Capteur de température à couches minces (Ni) à signal de sortie analogique en fréquence.



2 Coefficient de température TK 100.			
Matériau du capteur	TK 100 10 ⁻³ /K	Courbe caractéristique	Plage de mesure
Nickel (Ni)	5,1	légèrement progressive	-60...320
Cuivre (Cu)	4,1	légèrement progressive	-50...200
Platine (Pt)	3,5	légèrement dégressive	-220...850

Tableau 2

L'équation suivante peut donc être appliquée :

$$TK\ 100 = \frac{R(100\text{ °C}) - R(0\text{ °C})}{R(0\text{ °C}) \cdot 100K} \tag{8}$$

Les résistances en platine (Pt) présentent certes le coefficient de température le plus faible, mais font partie des capteurs résistifs de température

les plus précis et les plus stables au vieillissement. Elles sont disponibles sur le marché sous la désignation « PT 100 » ou « PT 1000 » (résistance nominale de 100 ou 1000 Ω à la température de référence de 20 °C) et selon différentes classes de tolérance (jusqu'à 0,1 °C) (figure 6). Seuls des capteurs Pt réalisés en technique à couches épaisses, dont la couche de Pt a été stabilisée par des additifs spéciaux, conviennent aux applications sous des températures maximales d'environ 1000 °C.

Résistances en couches épaisses (CTP/CTN)

Pour réaliser des éléments de compensation thermique, on emploie généralement des pâtes hautement résistives (une petite surface de contact suffit) à coefficient de température positif ou négatif. Etalonnables individuellement par laser, les résistances en couches épaisses ainsi obtenues

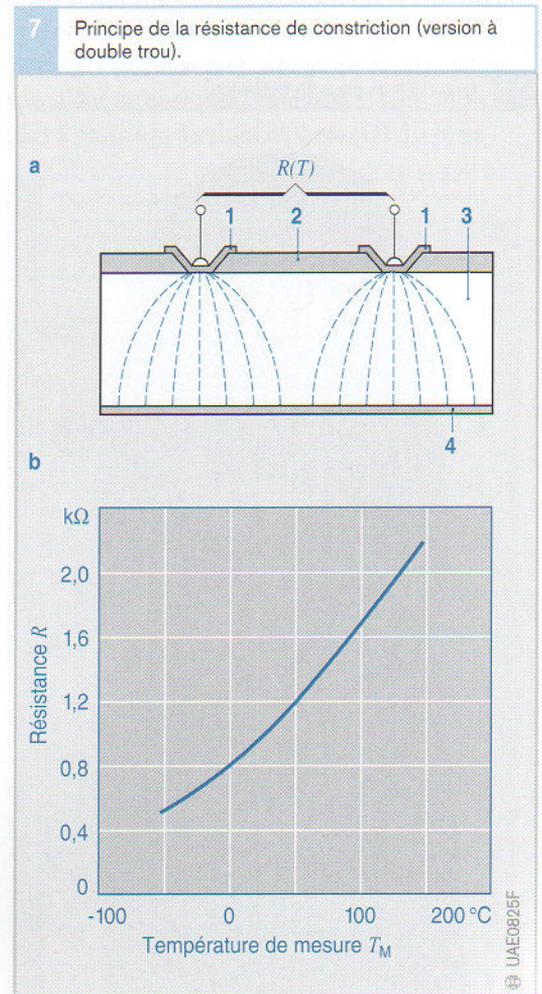
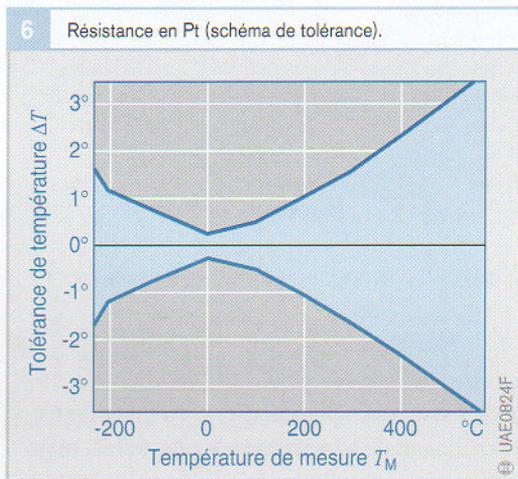
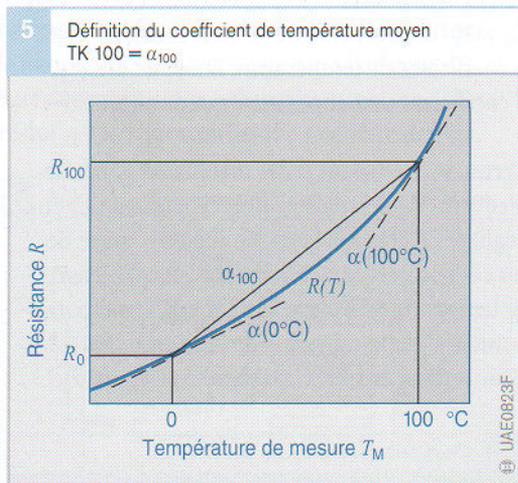
présentent elles aussi une courbe de réponse non linéaire (bien que moins incurvée que celle des thermistances CTN massives). L'effet physique peut être amplifié en constituant des montages diviseurs de tension à base d'éléments CTN et CTP.

Résistances semi-conductrices monocristallines au silicium (CTP)

Les capteurs de température réalisés en matériau semi-conducteur monocristallin tel que le silicium (Si) se caractérisent par l'intégration systématique sur la puce de détection d'autres circuits électroniques actifs et passifs (p. ex. un premier circuit de conditionnement du signal). L'étroitesse des marges de tolérance oblige à recourir pour la mesure à la méthode de la résistance de constriction (« spreading resistance ») (figure 7a) consistant à injecter dans la résistance de mesure

Figure 7

- a conception
- b courbe caractéristique
- 1 contacts
- 2 passivation (nitride, oxyde)
- 3 substrat en Si
- 4 contre-électrode sans connexion
- $R(T)$ résistance dépendante de la température



un courant par l'intermédiaire de deux contacts superficiels. Très localisé au voisinage des contacts, le courant diffuse ensuite radialement dans le matériau massif (cristal de silicium) jusqu'à la contre-électrode enveloppant la base de la puce capteur. L'avantage de cette méthode est que la résistivité du capteur dépend presque exclusivement de la constante très facilement reproductible du matériau et de la densité de courant très élevée au voisinage des contacts (réalisation par photolithographie pour un maximum de précision). En général, les capteurs sont disposés par couple en sens opposé et forment un montage série permettant d'obtenir une bonne indépendance de polarité (version à double trou, figure 7). La contre-électrode peut ainsi être réalisée sous forme d'un thermocontact métallique (sans fonction électrique).

La sensibilité de mesure est à peu près deux fois meilleure que celle d'une résistance classique au platine ($TK = 7,73 \cdot 10^{-3}/K$). La courbe de température est plus incurvée que celle d'un capteur métallique. La conductivité intrinsèque du

matériau limite le seuil de mesure supérieur à $+150\text{ }^\circ\text{C}$ environ (figure 7b). Des versions spéciales (figure 8) sont utilisables jusqu'à $300\text{ }^\circ\text{C}$.

Thermocouples

Les thermocouples sont surtout utilisés pour les étendues de mesure $\geq 1000\text{ }^\circ\text{C}$. Ils reposent sur « l'effet Seebeck » qui indique qu'une tension électrique prend naissance entre les extrémités d'un conducteur métallique où règnent des températures différentes T_1 et T_2 . Cette tension thermoélectrique (« f.é.m. thermoélectrique ») U_{th} dépend uniquement de la différence de température ΔT aux extrémités du conducteur (figure 9). On a donc :

$$U_{th} = c (T_2 - T_1) = c \Delta T \quad (9)$$

La constante de proportionnalité, qui est spécifique du matériau, est appelée « coefficient de Seebeck ».

Les tables de tension thermoélectrique (f.é.m. de Seebeck) ont été établies par rapport au pla-

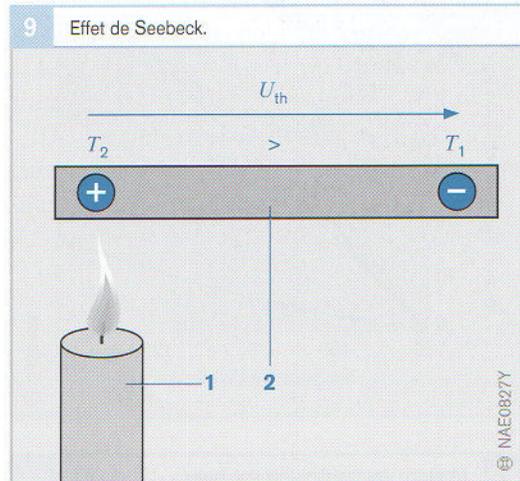
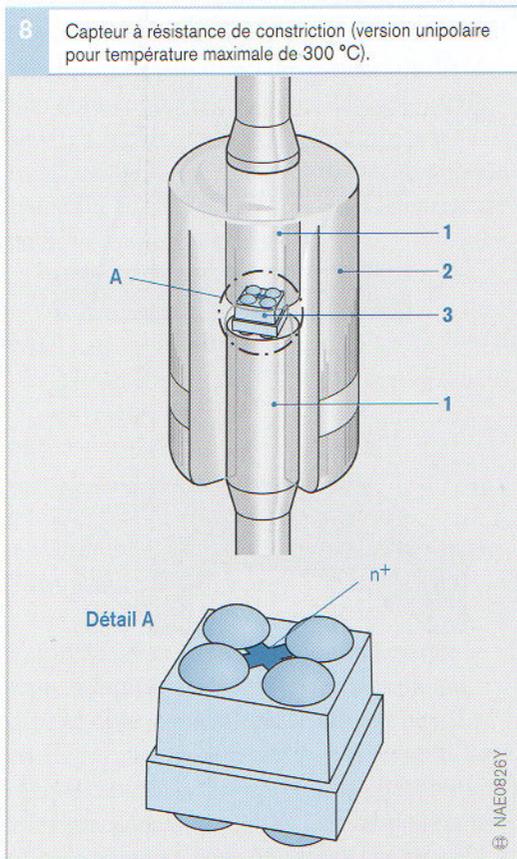


Figure 9
 1 source de chaleur
 2 conducteur métallique
 + haute, basse vitesse thermique des électrons
 - basse température des électrons
 T_2 température élevée
 T_1 faible température
 U_{th} tension thermoélectrique

3 Tension thermoélectrique U_{th} de différents métaux.

Matériau	Tension thermoélectrique U_{th} mV/100 °C
Constantan	-3,40
Nickel	-1,90
Paladium	-0,28
Platine	0,00
Cuivre	+0,75
Manganine	+0,60
Fer	+1,88
Silicium	+44,80

Figure 8
 1 fils métalliques
 2 verre
 3 cristal de Si

Tableau 3

tine comme matériau de référence (tableau 3). La raison en est la suivante : le conducteur utilisé pour la mesure de cette tension devant être relié à deux câbles de connexion (p. ex. en Cu), qui sont aussi soumis à la même différence de température, seule la détermination de l'écart de température entre le matériau à mesurer et celui des câbles de connexion est possible.

L'utilisation de paires de matériaux bien précises (figure 10, p. ex. fer/constantan, etc.) contribue à l'obtention de tensions aussi élevées que possible. Il est important que les deux branches d'un tel thermocouple, auxquelles est appliquée la température de mesure, soient reliées de manière à garantir une bonne conduction électrique (torsadées, soudées, brasées, etc.) (figure 11).

Les thermocouples présentent, en général, une faible longueur. Des prolongations jusqu'au point de saisie du signal peuvent être réalisées au moyen de « conducteurs de compensation » utilisant la même paire de matériaux. Il est important

que les deux extrémités libres du montage thermocouple se trouvent à la même température (de référence), sinon la différence de température, qui y règne, serait incluse dans la mesure. Les thermocouples ne mesurent donc que la différence de température par rapport à un point de référence. Si l'on veut connaître la température absolue au point de mesure, il convient de déterminer également la température au point de référence à l'aide d'autres moyens (p. ex. avec un capteur résistif).

En général, l'évolution des tensions thermoélectriques en fonction de la température n'est pas tout à fait linéaire, comme l'indique l'équation (8). Des circuits intégrés sont déjà disponibles pour l'amplification et la linéarisation des signaux – souvent assez faibles. Le montage en série de plusieurs thermocouples identiques permet l'augmentation de la tension de mesure. Tous leurs points de jonction « chauds » sont soumis à la température de mesure, tous leurs points

Figure 10

- 1 cuivre/constantan
- 2 fer/constantan
- 3 nickel-chrome/nickel
- 4 platine-rhodium/platine

Figure 11

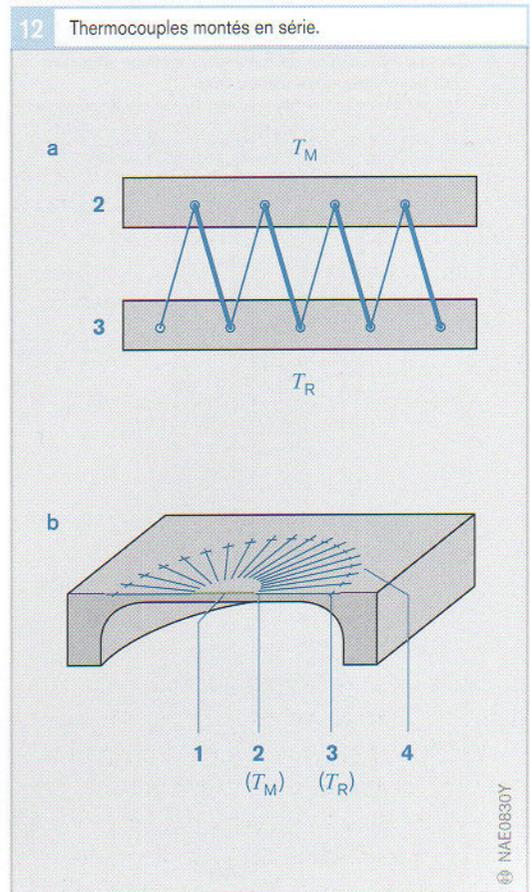
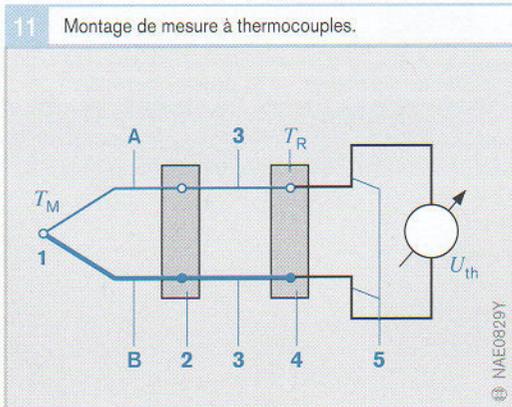
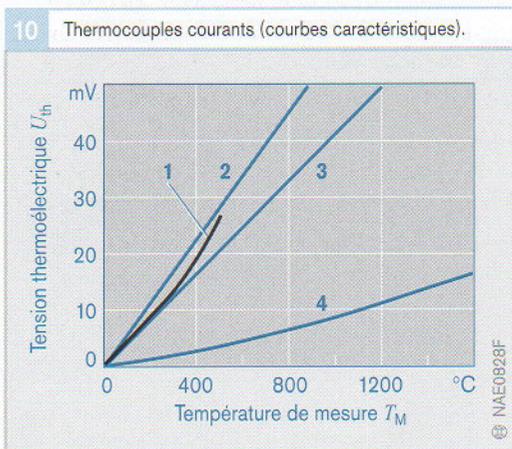
A/B paire de matériaux (branches du thermocouple)

- 1 point de mesure (liaison électrique conductrice)
- 2 tête de connexion
- 3 conducteur d'équilibrage
- 4 point de référence
- 5 câble de connexion (Cu)

T_M température de mesure
 T_R température de référence
 U_{th} tension thermoélectrique

Figure 12

- a principe de la thermopile
- b exemple d'application
- 1 surface sensible
- 2 connexions « chaudes » à la température de mesure T_M
- 3 connexions « froides » à la température de référence T_R
- 4 thermopile



« froids » à la température de référence (figure 12, thermopiles).

Les thermocouples constituent certes des moyens de mesure très robustes (p. ex. haute fiabilité CEM grâce à une faible résistance interne), mais pas très précis. Leur écart de mesure peut se trouver dans une plage de 5 à 15 °C. Ils ne présentent pas non plus une stabilité au vieillissement particulièrement bonne, si bien que même un calibrage individuel ne peut améliorer leur précision de façon durable.

Bien entendu, les thermocouples peuvent aussi être réalisés en technique à couches minces ou épaisses : des couches métalliques superposées constituent un très bon thermocontact. Les moyens de la technologie des microsystèmes permettent la fabrication de thermocouples de très petites dimensions. Ils conviennent surtout à la formation de thermopiles, qui regroupent p. ex. 50 à 100 éléments unitaires, et sont utilisés p. ex. dans les thermomètres à rayonnement sans contact (pyromètres).

Couches de déplétion semi-conductrices

La tension en sens direct des couches de déplétion semi-conductrices (figure 13), telle qu'elle apparaît sur les diodes et à la jonction base-émetteur des transistors, montre une très bonne évolution linéaire en fonction de la température pour un courant constant :

$$U_F(T) = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_F}{I_{sat}} + 1\right) \quad (10)$$

où :

$I_{sat} = I_{sat}(T)$ et $I_F = \text{const}$,
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (charge élémentaire),
 $k = 1,88 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ (constante de Boltzmann),
 T température absolue.

L'avantage de ce principe de mesure est que le capteur fournit directement une tension qui dépend de la température. Le capteur bipolaire est, de par nature, dépendant de la polarité. Pour chaque capteur, la tension en sens direct diminue assez précisément de 2 mV/°C, tandis que la tension absolue au niveau de chaque jonction di-

verge assez fortement d'exemplaire en exemplaire et qu'une mesure précise impose, le cas échéant, l'intégration d'éléments d'équilibre supplémentaires. Le courant de saturation I_{sat} qui diminue fortement au fur et à mesure que la température augmente, est surtout responsable du coefficient de température négatif. La conduction intrinsèque du silicium limite ici aussi l'utilisation de ces capteurs aux plages < 150 °C.

Des paires de transistors, couplées par leur jonction émetteur, sont parfois aussi utilisées pour la mesure des températures. Dans ce contexte, le rapport des courants de collecteurs constitue un paramètre spécifique de la température et parfaitement reproductible. Il est convertit le plus souvent en une tension de sortie analogique par l'intermédiaire d'un circuit intégré « sur puce ».

Des diodes de Zener fonctionnant en sens inverse constituent également des sondes de température utilisables ; leur variation de tension dépend beaucoup du niveau de la tension Zener. Il est possible de sélectionner des baisses de tension de différentes valeurs pour des tensions Zener < 4,7 V et des hausses de tension pour des tensions Zener > 4,7 V.

De tels capteurs sont aussi souvent utilisés dans le but d'assurer la compensation thermique interne des puces électroniques.

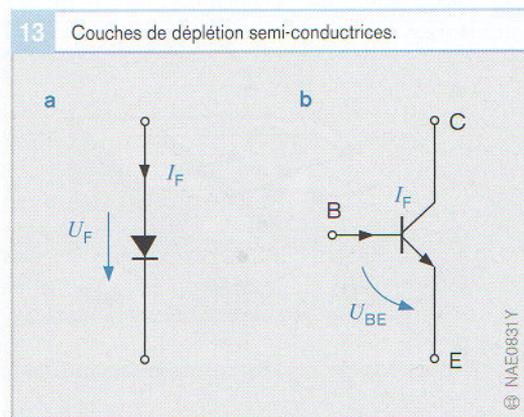


Figure 13
 a diode
 b transistor
 B base
 C collecteur
 E émetteur
 I_F courant en sens direct
 U_F tension en sens direct
 U_{BE} tension entre base et émetteur

Mesure des températures sans contact, pyrométrie

La pyrométrie est une méthode de mesure sans contact de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement que ce corps émet dans l'infrarouge (de préférence à des longueurs d'onde de 5 à 20 μm). La mesure effectuée donne en réalité la valeur du produit de l'énergie thermique rayonnée par le coefficient d'émission du corps. Bien que différent pour chaque matériau, le coefficient d'émission a une valeur voisine de 1 pour tous les matériaux techniquement intéressants (aussi le verre). Il est en revanche $\ll 1$ pour les matériaux réfléchissants ou transparents aux IR (p. ex. l'air ou le silicium).

L'élément sensible utilisé pour la mesure présente la particularité de s'échauffer légèrement par rapport à son environnement en présence d'un rayonnement infrarouge (échauffement typique : 0,01 à 0,001 $^{\circ}\text{C}$). Sa température constitue

un paramètre spécifique de la température de l'objet étudié. Bien souvent, l'écart de température entre l'objet et le point de mesure ne correspond plus qu'à 1/1000 de la différence de température initiale. Malgré tout, la température de l'objet peut être déterminée avec une approximation de 0,5 $^{\circ}\text{C}$.

Bolomètre

Il s'agit d'un capteur résistif de température extrêmement sensible permettant de mesurer une faible augmentation de température (figure 14). La mesure de la température du boîtier de ce capteur impose l'emploi d'une sonde supplémentaire. Une synchronisation parfaite de ces deux est toutefois nécessaire à la détection d'une large plage de température. Le boîtier du capteur étant généralement équipé d'un thermostat, la sonde de mesure primaire (qui est bien isolée par rapport au boîtier) fonctionne donc toujours au même point de température.

Figure 14

- 1 cylindre et lentille
- 2 connexions
- 3 boîtier du détecteur infrarouge
- 4 fenêtre infrarouge
- 5 détecteur

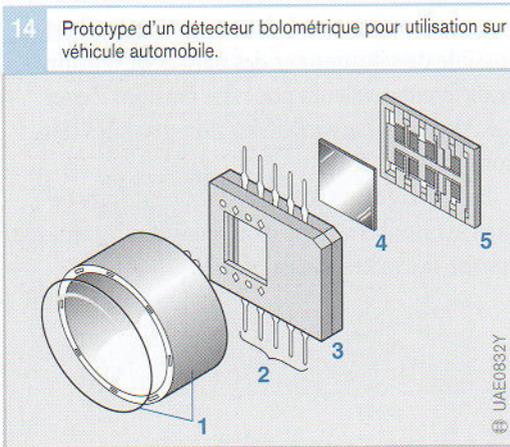
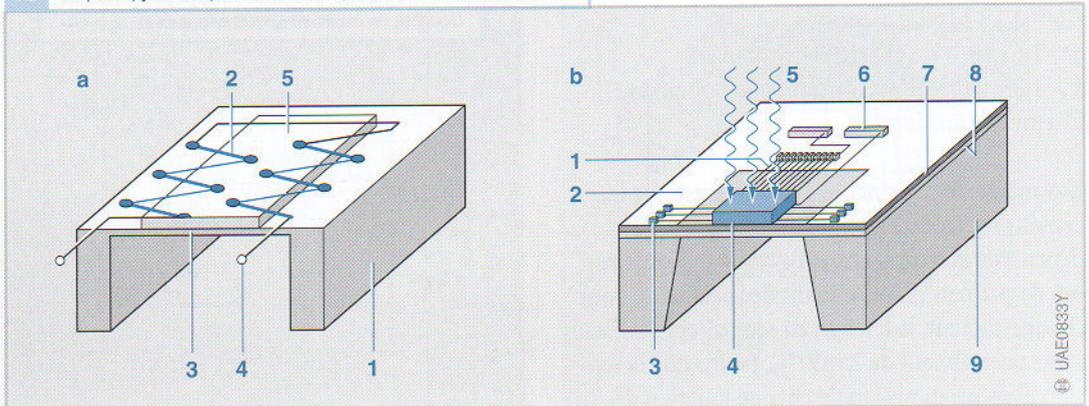


Figure 15

- a principe de la cellule de mesure
- 1 puce de Si
 - 2 thermocouples montés en série (p. ex. Al/poly-Si)
 - 3 membrane en SiN
 - 4 connexions de la thermopile
 - 5 couche d'absorption

- b réalisation du capteur
- 1 thermocouple
 - 2 contact « froid »
 - 3 membrane
 - 4 absorbeur
 - 5 rayonnement thermique
 - 6 connexion électrique
 - 7 couche de Si_3N_4
 - 8 couche de SiO_2
 - 9 collecteur de température

15 Capteur pyrométrique micromécanique à détection par thermopile.



Capteurs à thermopile

La mise en œuvre d'éléments thermopiles favorise la mesure de la différence de température générée par le faible rayonnement de l'objet étudié sur une large plage de température de fonctionnement. Le montage en série d'un grand nombre de thermopiles permet d'amplifier l'effet de mesure. Les capteurs à thermopiles sont réalisables à moindres coûts par micro-usinage (figure 15). Tous les points « chauds » sont placés sur une fine membrane à inertie thermique très importante, tous les points « froids » sur le bord plus épais de la puce (collecteur de température). Le temps de

réponse typique est de 20 ms. Un tel capteur « mono-pixel » se prête p. ex. très bien à la mesure de la température superficielle d'un pare-brise, afin de prévenir son embuage si le seuil de température devient inférieur au point de rosée.

Capteurs monopoint, capteurs d'images

La réunion en matrice de plusieurs thermopiles (p. ex. 4 x 4) permet l'obtention d'images grossières (imagerie IR thermique), à condition de rapprocher suffisamment les pixels et de bien les isoler thermiquement les uns par rapport aux autres (figure 16). Le mode d'accès aux pixels étant direct, la puce possède un nombre important d'interconnexions. En cas de conditionnement sous boîtier TO5, le circuit ASIC de pré-amplification et de sérialisation du signal est placé à proximité du capteur et comporte en général, pour la détermination de la température absolue des pixels, un capteur de référence permettant de mesurer la température des objets avec une précision d'environ ±0,5 K.

Pour pouvoir détecter une scène, l'imageur thermique doit comporter une optique IR de focalisation. La solution très économique du miroir concave est rarement retenue car trop encombrante. Les lentilles en verre ne laissant pas passer le rayonnement IR et les lentilles plastiques ne supportant pas des températures supérieures à 85 °C, on emploie en général des lentilles en silicium à diffraction (Fresnel) ou à réfraction. Parfaitement adaptées à ce type d'application, les lentilles en silicium sont réalisables à moindres coûts par micro-usinage, jusqu'à un diamètre d'environ 4 mm. Placées dans le couvercle d'un

boîtier TO5, elles préviennent par ailleurs toute détérioration directe du capteur (figure 17). L'adjonction d'un gaz protecteur dans le boîtier accentue quelque peu la diaphonie entre pixels, mais abaisse parallèlement leur temps de réaction.

Exemples d'application

- température de l'air d'admission,
- température du moteur,
- régulation de la température de l'habitacle,
- capteur haute température pour gaz d'échappement,
- capteur d'image infrarouge.

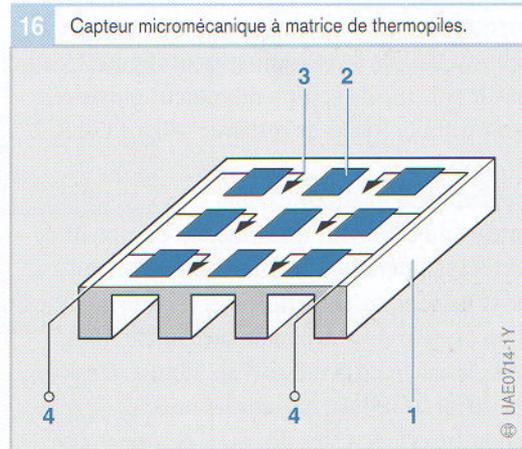


Figure 16
 1 puce de Si
 2 pixel
 3,4 connexions des pixels

17 Imageur thermique IR.

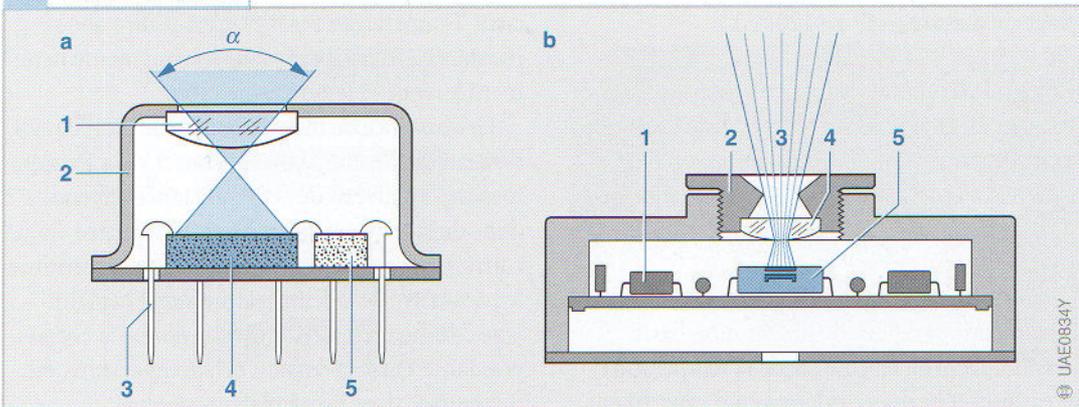
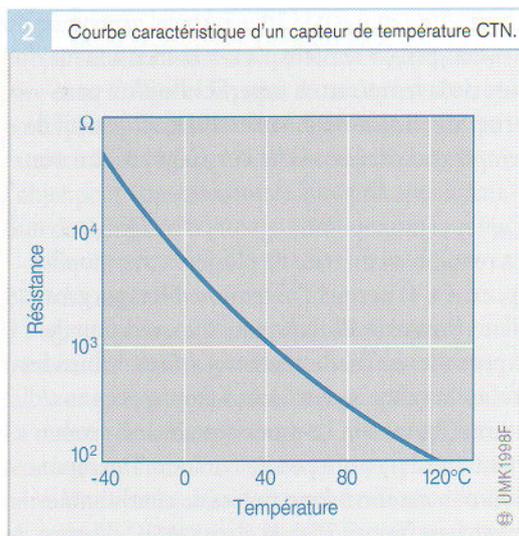
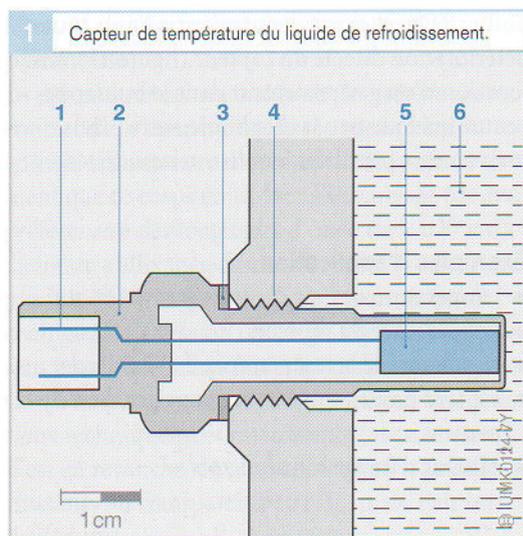


Figure 17
 a capteur d'images IR
 1 lentille IR en silicium
 2 boîtier TO5
 3 champ de vision de la caméra
 alpha angle de vision
 b caméra IR simple
 1 électronique
 2 objectif
 3 champ de vision de la caméra
 4 lentille IR en silicium
 5 matrice sensible

Figure 1

- 1 connexion électrique
- 2 culot
- 3 joint
- 4 filetage
- 5 résistance de mesure
- 6 liquide de refroidissement



Capteurs de température

Applications

Capteur de température moteur

Il est placé dans le circuit de refroidissement et permet de déduire la température du moteur de celle du liquide de refroidissement (figure 1), afin que le système de gestion du moteur puisse en tenir compte (plage de mesure : -40 à $+130$ °C).

Capteur de température d'air

Intégré au collecteur d'admission, ce capteur détecte la température de l'air d'admission qui est prise en compte, en liaison avec les informations d'un capteur de pression de suralimentation, pour le calcul de la masse d'air admise. De plus, les valeurs de consigne pour les boucles de régulation (p. ex. recyclage des gaz d'échappement, régulation de la pression de suralimentation) peuvent être adaptées à la température de l'air (plage de mesure : -40 à $+120$ °C).

Capteur de température de l'huile moteur

Le signal du capteur de la température de l'huile moteur est utilisé pour la détermination des périodicités d'entretien (plage de mesure : -40 à $+170$ °C).

Capteur de température de carburant

Il est intégré au circuit d'alimentation basse pression. La prise en compte de la température du carburant permet de déterminer exactement

la quantité de carburant à injecter (plage de mesure : -40 à $+120$ °C).

Capteur de température des gaz d'échappement

Ce type de capteur est monté en un point de température critique de la tuyauterie d'échappement. Il sert à la régulation des systèmes de post-traitement des gaz d'échappement. La résistance de mesure est généralement en platine (plage de mesure : -40 à $+1000$ °C).

Conception et fonctionnement

Les capteurs de température sont proposés sous différentes formes adaptées aux applications spécifiques. Leur boîtier contient une résistance de mesure variable en fonction de la température. Cette dernière présente, en général, un coefficient de température négatif (CTN Coefficient Température Négatif, figure 2) ou, plus rarement, un coefficient de température positif (CTP Coefficient Température Positif), c'est-à-dire que sa résistance électrique diminue ou augmente nettement lorsque la température croît.

La résistance de mesure fait partie d'un circuit diviseur de tension alimenté sous 5 V. La tension mesurée au niveau de cette résistance dépend donc de la température. Elle est enregistrée via un convertisseur analogique-numérique et constitue le paramètre de la température sur le capteur. Une courbe caractéristique, qui donne la correspondance entre la tension et la température, est mémorisée dans le calculateur moteur.

Micromécanique

La « micromécanique » désigne la branche de la mécanique consistant à réaliser des structures mécaniques miniatures en semi-conducteurs (le plus souvent en silicium) à partir des technologies propres à la microélectronique. La micromécanique met à profit à la fois les propriétés semi-conductrices et mécaniques du silicium. La réalisation de fonctions de détection est ainsi possible dans un espace très restreint. Les technologies suivantes sont appliquées :

Micro-usinage de volume

Le matériau de la tranche de silicium est traité sur toute son épaisseur par gravure anisotrope (alcaline) accompagnée ou non d'un arrêt d'attaque par voie électrochimique. La structure souhaitée est obtenue en gravant dans la masse la tranche de silicium par la face arrière (figure 1, rep. 2) aux points où aucun masque de gravure (1) n'a été placé. Ce procédé permet la réalisation de membranes très fines (a) d'une épaisseur typique de 5 à 50 µm, d'orifices (b) ainsi que de poutres et ponts (c) p. ex. pour des accéléromètres ou des capteurs manométriques.

Micro-usinage de surface

Le matériau support est une tranche de silicium à la surface de laquelle sont formées de très petites structures mécaniques (figure 2). La première étape de fabrication d'un composant consiste à appliquer et à structurer par des procédés standard une « couche sacrificielle » en oxyde de silicium (A). Une couche de polysilicium (B) d'environ 10 µm d'épaisseur est ensuite déposée par épitaxie sur cette couche sacrificielle. La couche épitaxiée reçoit la structure voulue (C) par masquage et gravure anisotrope, autrement dit verticale. Au cours de la dernière phase, la couche d'oxyde de silicium sous-jacente à la couche de polysilicium est supprimée avec du fluorure d'hydrogène gazeux (D). Cette méthode permet de libérer les structures, p. ex. les électrodes mobiles (figure 3) des accéléromètres.

Soudure de substrats

Dans le cas de la soudure anodique (wafer bonding) et du scellement par verre de soudure (seal-glass bonding), deux tranches de silicium sont rendues solidaires sous l'action d'une tension et de la chaleur ou d'une pression et de la chaleur. Ces techniques sont utilisées par exemple pour assurer l'enveloppement hermétique d'un vide de référence ou pour protéger les structures sensibles par application de calottes.

1 Structures réalisables par micro-usinage de volume.

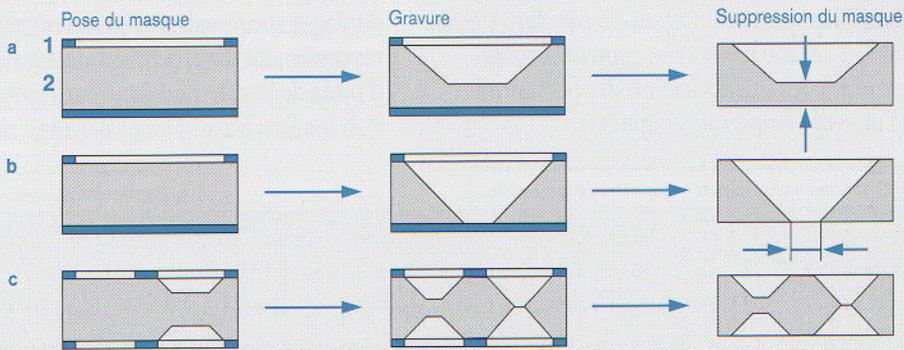
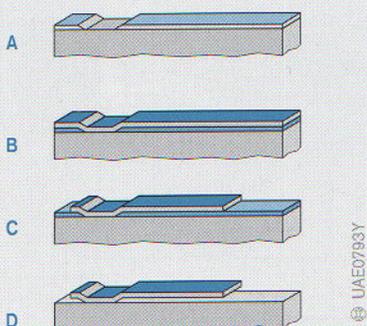


Figure 1
 a réalisation d'une membrane
 b réalisation d'une ouverture
 c réalisation de poutres et de ponts
 1 masque de gravure
 2 silicium

2 Etapes de micro-usinage de surface.



3 Détails d'une structure réalisée par micro-usinage de surface.

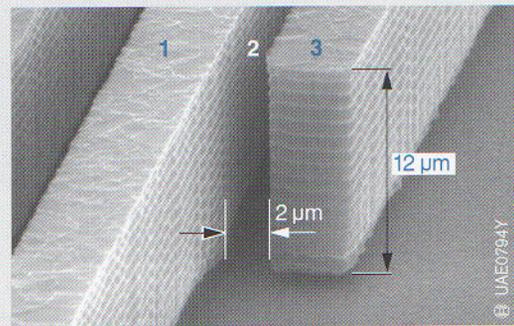


Figure 2
 A dépôt et structuration de la couche sacrificielle
 B dépôt du polysilicium
 C structuration du polysilicium
 D suppression de la couche sacrificielle

Figure 3
 1 électrode fixe
 2 interstice
 3 électrode mobile

Perspectives

Orientation des études

Il est probable que beaucoup plus de nouveaux capteurs seront mis au point, à l'avenir, pour la détection à proximité immédiate et à grande distance du véhicule (figure 1) que pour des fonctions de captage au niveau de la chaîne cinématique. Cette évolution inclut également les capteurs qui détectent les mouvements (cinématique) du véhicule considéré comme mobile individuel et comme participant au flux de circulation routière, ainsi que les capteurs qui détectent le contact direct des roues sur la chaussée. Dans ce contexte, il convient de tenir compte de plusieurs nouveaux concepts et objectifs essentiels, à savoir :

- conduite et guidage du véhicule en fonction de la destination prévue (navigation),
- conduite et guidage sûrs du véhicule par des systèmes d'assistance électronique (dans les limites des possibilités de la physique),
- amélioration de la protection des passagers associée à une haute « intelligence » et à l'objectif prévisionnel de prévention des collisions,
- sécurisation du véhicule au moyen de systèmes antivols faisant appel à des capteurs biométriques (p. ex. identification des personnes à l'aide des empreintes digitales).

Ces capteurs constituent également une base évolutive pour une conduite semi-autonome ou – en tant qu'objectif à long terme – pour une conduite totalement autonome.

Exemples de capteurs

Capteurs d'images (vidéo)

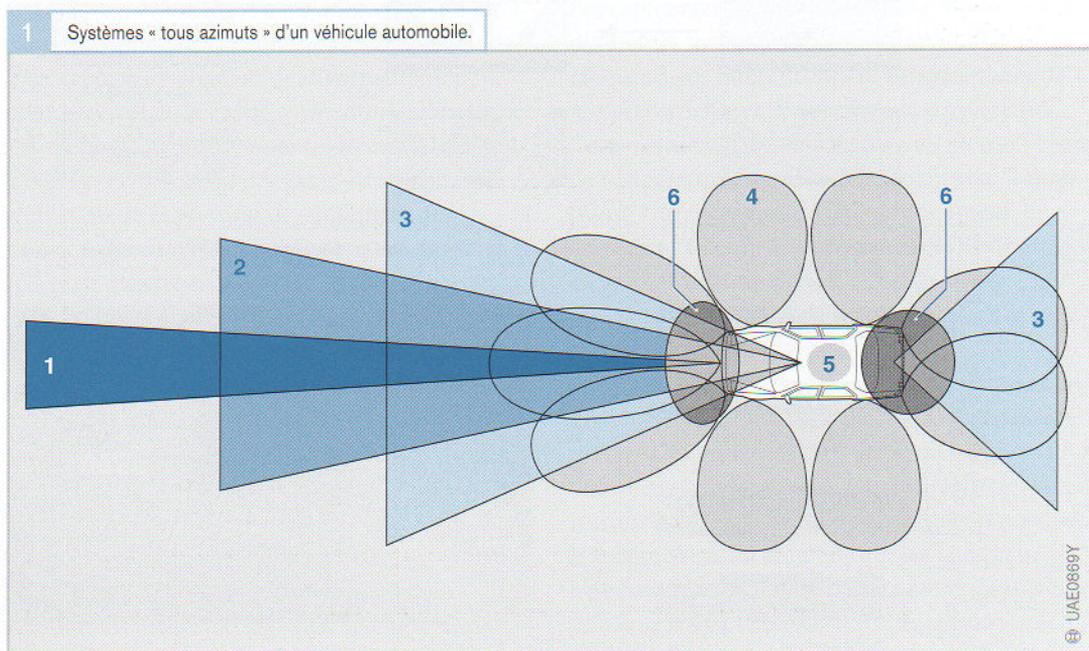
A l'avenir, les capteurs reproduisant des images sur la base de la lumière visible ou du spectre infrarouge trouveront de multiples applications en automobile. Ils serviront non seulement à la surveillance de l'habitacle, mais aussi à l'observation de l'environnement du véhicule.

Ces capteurs devraient permettre de reproduire (jusqu'ici de façon plutôt sommaire) les étonnantes facultés de vision et d'interprétation mentale de l'être humain. Il ne fait aucun doute que dans un proche avenir le prix des capteurs d'images et des processeurs performants, nécessaires à l'interprétation d'une scène, va baisser au point de rendre ces produits attractifs pour les applications automobiles.

Contrairement à l'œil humain, les capteurs d'images courants sont également réceptifs au rayonnement du proche infrarouge (longueur d'onde de l'ordre de $1 \mu\text{m}$), un atout qui les rend

Figure 1

- 1 radar longue portée 77 GHz, lancement série (longue portée $\leq 120 \text{ m}$)
- 2 appareil de vision infrarouge longue portée/zone de proximité (vue nocturne)
- 3 vidéo de supervision de la zone extérieure (vue nocturne, moyenne portée $\leq 40 \text{ m}$)
- 4 radar de proximité 24 GHz (zone rapprochée $\leq 10 \text{ m}$)
- 5 vidéo de supervision de l'habitacle
- 6 ultrasons, lancement série (zone ultraproche $\leq 1,5 \text{ m}$)



parfaitement utilisables la nuit à condition de travailler dans le spectre invisible.

Les capteurs d'images trouveront à l'avenir de multiples applications en automobile, principalement pour l'observation de l'habitacle (position des sièges, avancement des passagers en cas de collision, présence et taille des passagers, etc) et la surveillance de l'environnement du véhicule (tenue de cap, prévention des collisions, assistance au parquage et à la marche arrière, détection de panneaux de signalisation, etc.).

Les capteurs d'images constituent un type particulier de « structures multicapteurs ». Ils font appel à des éléments photosensibles (points image ou pixels) disposés en lignes (capteurs linéiques) ou en matrices (capteurs matriciels) et assortis d'une optique de focalisation classique. Les capteurs au silicium actuellement les plus utilisés (capteurs CCD = Charge-Coupled Devices, figures 2 et 3) fonctionnent comme suit : la lumière incidente captée par une électrode transparente donne naissance, proportionnellement à son intensité et au temps d'exposition, à des charges électriques qui sont stockées dans un puits de potentiel (couche frontière Si-SiO₂), puis transférées par d'autres électrodes dans une zone opaque à la lumière, où des registres à décalage « analogiques » (principe de la chaîne à seaux) les acheminent ligne par ligne vers un registre de

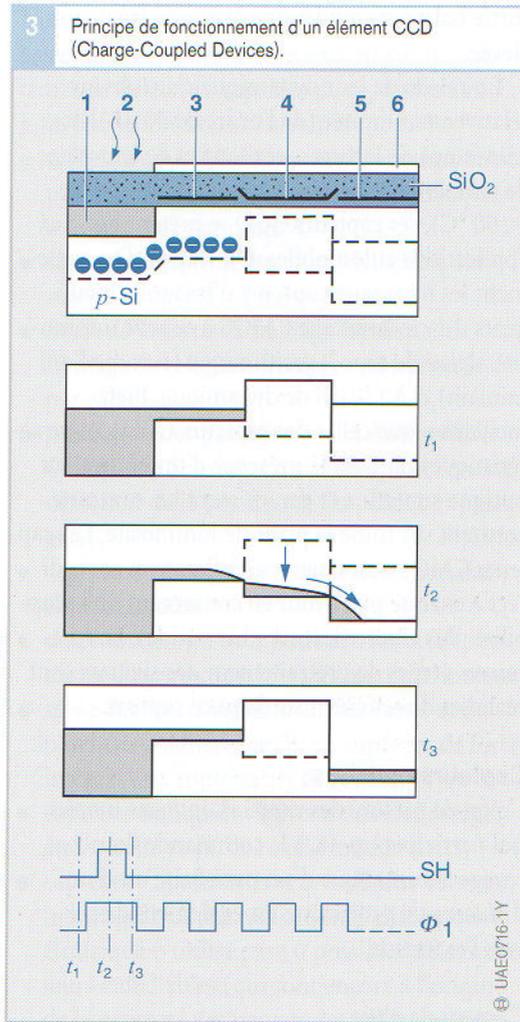


Figure 3

- 1 photodiode
- 2 lumière
- 3 électrode de stockage
- 4 grille de décalage
- 5 électrode de transfert
- 6 masque optique

2 Synoptique d'un capteur d'images.

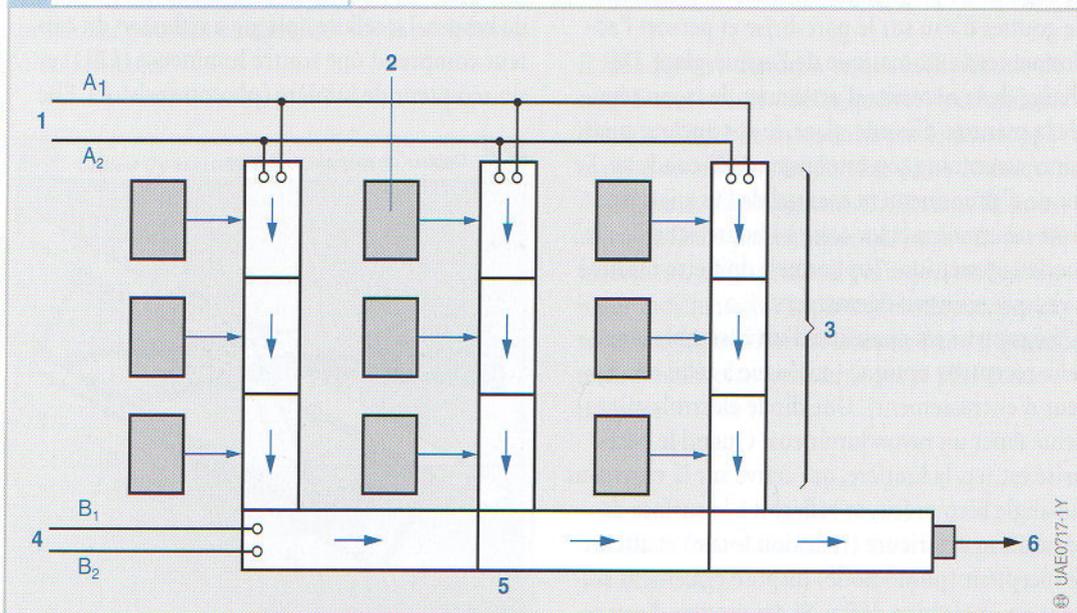


Figure 2

- 1 horloges de balayage de colonnes A₁/A₂
- 2 photo-éléments
- 3 matrice CCD
- 4 horloges de balayage de lignes B₁/B₂
- 5 registre de sortie
- 6 sortie vidéo

sortie balayé en mode série avec une fréquence élevée.

En raison de leur dynamique clair/obscur relativement limitée (de l'ordre de 50 dB), de leur temps de lecture assez long et de leur plage de température de fonctionnement restreinte (< 50 °C), ces capteurs CCD se prêtent mal aux applications automobiles. On leur préfère nettement les nouveaux capteurs d'images « intelligents » en technologie CMOS à courbe luminosité/signal de type logarithmique (comme l'œil humain) et à 120 dB de dynamique. Bien meilleures que celles des capteurs CCD, ces caractéristiques rendent la présence d'un obturateur optique superflue et garantissent un contraste constant sur toute la plage de luminosité. Les capteurs CMOS autorisent par ailleurs un accès direct à chaque pixel, tout en conservant une sensibilité plus élevée (lecture plus rapide). Les premières étapes de prétraitement des signaux sont réalisées directement sur la puce capteur.

Capteurs optiques

L'effet de mesure des *capteurs optiques simples*, qui participent p. ex. à la commande du nettoyage automatique d'un pare-brise ou d'un diffuseur de projecteur, est également dirigé vers l'extérieur.

Capteur de pluie

Le capteur de pluie (figure 4) détecte la présence de gouttes d'eau sur le pare-brise et permet l'actionnement automatique de l'essuie-glace. Déchargé de la nécessité d'actionner de façon répétée la manette d'essuie-glace, le conducteur peut concentrer toute son attention sur la conduite. Le mode d'actionnement manuel de l'essuie-glace reste néanmoins prioritaire à l'heure actuelle ; le mode automatique (optionnel) doit être réactif à chaque nouveau démarrage.

Le capteur est constitué d'un ensemble émetteur-récepteur optique (analogue à celui du capteur d'encrassement). Une diode électroluminescente émet un rayon lumineux. Quand le pare-brise est sec, la lumière, qui arrive sur la vitre sous un angle bien précis, se réfléchit à la surface de séparation extérieure (réflexion totale) et atteint le récepteur (photodiode) disposé également suivant un angle bien défini. Si des gouttes d'eau se

trouvent sur la face extérieure, une fraction considérable de la lumière est déviée vers l'extérieur et affaiblit le signal de réception. A partir d'un degré bien déterminé, l'essuie-glace se met automatiquement en marche, aussi en présence de salissures.

Le capteur commande la vitesse de balayage de l'essuie-glace en fonction de la quantité de pluie mesurée. En association avec des opérateurs d'essuie-glace à régulation électronique, la vitesse de balayage en fonctionnement intermittent peut être modulée en mode continu. En cas de fortes projections d'eau sur le pare-brise, p. ex. lors du dépassement d'un poids lourd, le système commute immédiatement sur la vitesse maximale.

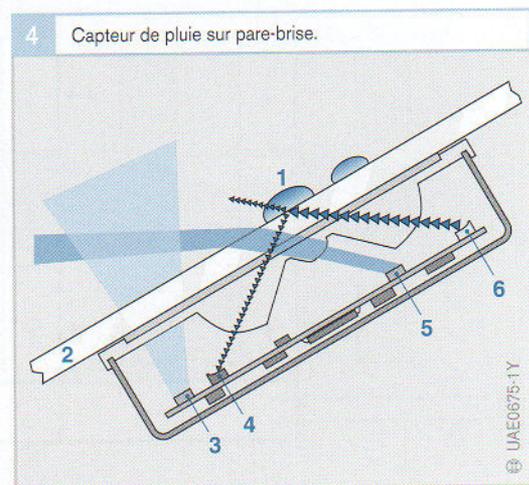
Il est également possible d'utiliser le capteur de pluie pour la fermeture automatique des vitres et du toit ouvrant. Equipé d'un capteur de lumière supplémentaire, il peut même activer l'éclairage du véhicule en cas d'obscurité ou à l'entrée d'un tunnel sans l'intervention du conducteur. Il est même envisageable d'exploiter les signaux du capteur de pluie en vue de communiquer à un système de télématique routière les conditions météorologiques régnant sur un itinéraire bien déterminé.

Capteur d'encrassement

Ce type de capteur (figure 5) détecte le degré d'encrassement des diffuseurs des projecteurs de façon à initier leur nettoyage automatique en cas de besoin. La cellule optique à réflexion du capteur comprend une source lumineuse (LED) et un récepteur de lumière (phototransistor). Elle

Figure 4

- 1 goutte de pluie
- 2 pare-brise
- 3 capteur de lumière ambiante
- 4 photodiode
- 5 capteur de lumière orienté vers le lointain
- 6 diode électroluminescente



est logée à l'intérieur du diffuseur dans la zone de balayage, mais pas sur le trajet optique direct des rayons lumineux de l'éclairage du véhicule. Si le diffuseur est propre ou même recouvert de gouttes de pluie, le faisceau lumineux de mesure rayonnant dans le proche infrarouge passe à l'extérieur sans obstacle. Seule une infime fraction du faisceau est réfléchi vers le récepteur. Mais si le faisceau lumineux bute à la surface du diffuseur sur des particules de crasse, une quantité de lumière proportionnelle au degré d'encrassement est renvoyée vers le récepteur. Au delà d'un seuil bien défini, le lave-phare se déclenche automatiquement.

Radar télémétrique de proximité (24 GHz)

En cas de collision frontale ou latérale de véhicules compacts, le temps disponible pour le déclenchement des systèmes de sécurité et de retenue est extrêmement court (≤ 5 ms). Dans cette situation, la distance entre le véhicule heurtant et les occupants du véhicule heurté est très faible. Contrairement aux véhicules de grande taille, qui résistent relativement bien à un choc frontal éventuel, les automobiles compactes ne disposent pas d'assez d'éléments de carrosserie déformables et absorbant l'énergie. Il serait donc avantageux de pouvoir prévoir, avec grande fiabilité, une collision ou la gravité d'un choc avant le premier contact. A cet effet, des études sont actuellement en cours pour la réalisation de capteurs radars de proximité pouvant être montés sur la périphérie d'un véhicule.

Nouveaux systèmes de capteurs

Les études actuelles se concentrent sur des systèmes de détection capables de répondre aux nouvelles applications suivantes :

- saisie du couple de braquage (direction assistée par moteur électrique, système de direction « commandé par câble »,
- saisie du couple de traction (détection des ratés d'allumage, signal de charge),
- saisie de la force de freinage (systèmes de freinage électriques, freinage « commandé par câble »),
- protection des passagers (AOS Automotive Occupancy Sensing, Out-of-Position Sensing, détection de la position et du poids des passagers),
- capteur de déformation pour détection des chocs latéraux,
- détection des piétons pour activation de systèmes de protection intégrés au capot moteur,
- saisie des forces agissant sur les roues et du potentiel d'adhérence (p. ex. capteurs de force intégrés aux roulements de roues),
- capteurs de liquides (niveau de remplissage, état/qualité p. ex. de l'huile moteur, etc.),
- capteurs « autonomes », c.-à-d. sans contact, interrogeables par radio, dont l'alimentation électrique n'utilise pas (si possible) de connecteurs enfichables (qui sont encore à l'origine de la majorité des pannes des véhicules automobiles).

Il faut donc s'attendre à ce que la multitude de nouveaux systèmes électriques et électroniques d'une automobile se traduise par le développement d'un nombre important de nouveaux types de capteurs. Parallèlement, il convient de poursuivre la tâche permanente qui implique le remplacement, au bout d'une période d'utilisation jugée judicieuse sur le plan commercial, des capteurs employés à l'heure actuelle par de nouvelles technologies plus performantes et plus économiques.

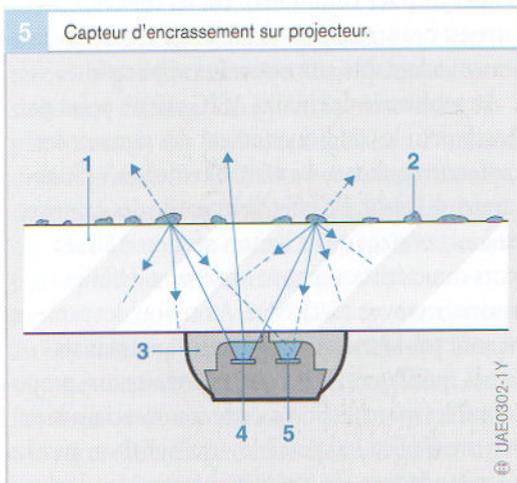


Figure 5

- 1 diffuseur
- 2 particule de crasse
- 3 boîtier de capteur
- 4 émetteur
- 5 récepteur

Traitement des signaux des capteurs

Conditionnement des signaux (C.I. d'évaluation)

Avant leur introduction dans l'étage numérique de traitement général, les signaux des capteurs nécessitent un conditionnement spécifique (voir au chapitre « Traitement des données ». Le conditionnement des signaux (SA) peut inclure les fonctionnalités (optionnelles) suivantes :

- amplification (DC, AC),
- redressement (aussi avec synchronisation de phases),
- évaluation des valeurs de seuils (aussi de seuils glissants), conformation d'impulsions,
- conversion tension/fréquence, modulation de la durée d'impulsion,
- filtrage de fréquences, y compris protection contre les tensions parasites,
- conversion analogique/numérique ou numérique/amalogique,
- équilibrage des dérives (offset) et amplification (caractéristique générale) analogique, numérique (y compris (E²)PROM)),
- linéarisation,
- équilibrage de la compensation de température (analogique, numérique),
- remise à zéro automatique, possibilité de calibrage durant le fonctionnement,
- auto-surveillance (diagnostic embarqué, sortie de diagnostic) et fonctions de test,
- régulation des capteurs asservis à une servo-commande (principe de compensation),
- génération d'une tension alternative pour les systèmes de capteurs à fréquence porteuse,
- stabilisation de l'alimentation en tension,
- protection des étages de sortie et d'excitation contre les courts-circuits et les surtensions,
- multiplexeur de signaux, sérialisation analogique et/ou numérique des signaux, codage, y compris détection des défauts,
- interface pour bus de multiplexage (p. ex. CAN),
etc.

Toutes ces fonctionnalités sont généralement disponibles sous forme de circuits intégrés à application spécifique appelés « ASIC » (Application Specific Integrated Circuits). Ces circuits réalisés « sur mesure » pour chaque application peuvent

être disposés côté capteur (implantation locale) ou bien côté calculateur électronique. Dans certains cas, les diverses fonctions sont même réparties des deux côtés – si cela s'avère judicieux. L'intégration locale du circuit au capteur (figure 1, du premier au troisième degré d'intégration) offre l'avantage suivant : le capteur et l'étage de conditionnement des signaux (SA) peuvent être étalonnés et compensés en commun. Ils constituent un module homogène et quasiment immun aux perturbations. En cas de défaillance de l'un des composants, il convient de remplacer la totalité du module.

Si la fonction précitée devait être réalisée autrefois par l'intermédiaire de circuits indépendants (p. ex. C.I. CMOS pour le traitement des signaux, C.I. bipolaire comme étage d'excitation insensible aux tensions parasites), les technologies composites actuelles (p. ex. BICMOS, BCD) permettent également l'intégration de la fonctionnalité complète dans une puce unique, y compris d'éventuelles mémoires numériques programmables (PROM). Dans la plupart des cas, il est même possible de réaliser l'intégration monolithique du capteur et du conditionneur de signaux (p. ex. pour les capteurs manométriques au silicium et les capteurs Hall). L'euphorie initiale pour ce mode d'intégration a cependant été supplantée par des considérations objectives en terme d'économie. Aujourd'hui, d'autres méthodes d'intégration plus rentables, qui correspondent au stade actuel de la technologie, sont utilisées pour la fabrication de cellules de détection (p. ex. hybrides à couches épaisses, socle et boîtier de puce communs). Un tel concept modulaire est beaucoup plus flexible, car il est plus facilement adaptable aux nouvelles applications.

La multitude de circuits ASIC mis au point par Bosch pour le conditionnement des signaux des capteurs représente un véritable « trésor » d'une immense valeur. En effet, la majorité des capteurs ne fonctionnent qu'en liaison avec ces ASIC et leurs caractéristiques sont également définies en association avec ces circuits. Au cas où des capteurs ne sont pas fabriqués uniquement pour les systèmes spécifiques de l'entreprise, mais aussi proposés sur les marchés libres, cette commercialisation externe n'a lieu – si possible – qu'en liaison avec les circuits adéquats de conditionnement des signaux.

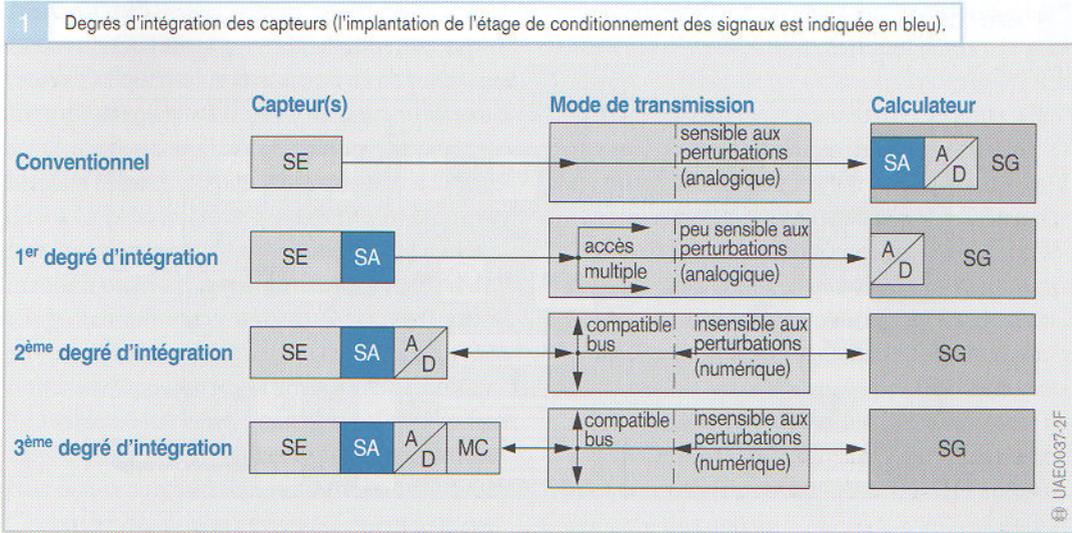


Figure 1
 SE capteur(s)
 SA conditionnement du signal (analogique)
 A/D convertisseur analogique/numérique
 SG calculateur électronique (numérique)
 MC micro-contrôleur

Exemples d'application

À l'origine, les ASIC ont été conçus pour être montés de préférence dans les calculateurs électroniques. Cette méthode ne pouvait toutefois pas tenir compte des exigences qui reposent en partie sur les propriétés individuelles et spécifiques des capteurs. En règle générale, les circuits sont maintenant étudiés pour être adaptés directement aux capteurs. Les ASIC sont alors capables de constituer des capteurs « intelligents » par mémorisation de paramètres d'étalonnage et de compensation et par exécution de corrections en cas d'erreurs ou de défauts. Parmi la multitude de circuits ASIC, les exemples suivants font l'objet d'une description détaillée :

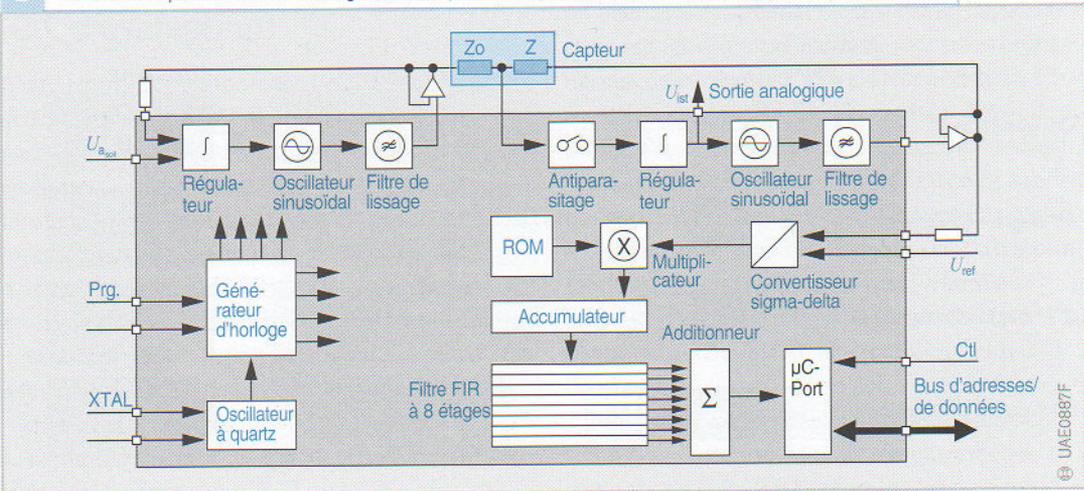
ASIC CC212

Le circuit CC212 est un ASIC destiné aux capteurs à bague de court-circuitage (p. ex. en version semi-différentielle) pour la mesure des déplacements et des positions angulaires. En raison de leur grand effet de mesure et de leur fréquence de fonctionnement modérée (5 à 50 kHz), les capteurs à bague de court-circuitage n'imposent pas la présence de l'électronique au point de montage. Le circuit ASIC CC212 est donc intégré au calculateur. Il regroupe l'ensemble de l'électronique qui est nécessaire p. ex. à l'activation et à l'évaluation du capteur semi-différentiel affecté à la régulation électronique diesel. Il génère un signal de sortie analogique et un signal numérique.

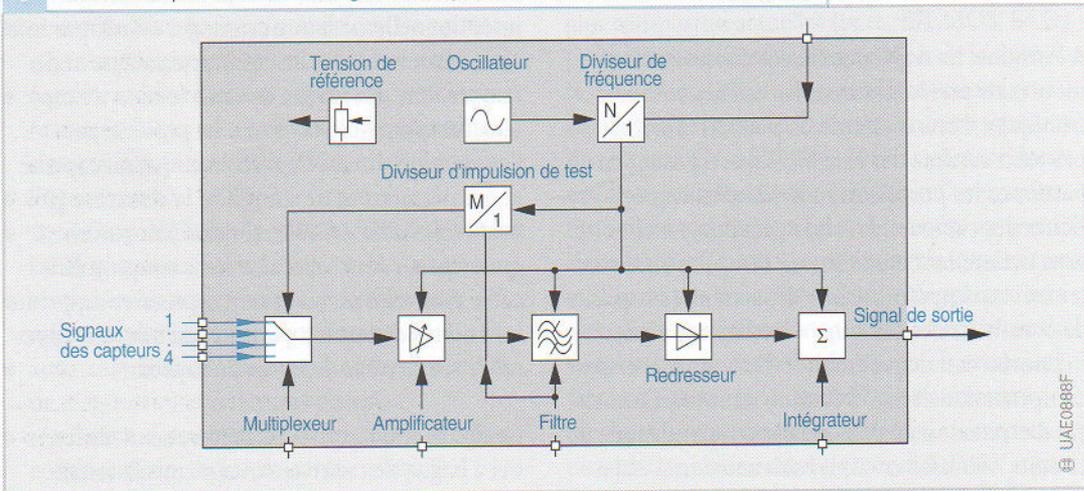
Lors de la conception de cet ASIC, il a été renoncé intentionnellement aux avantages offerts par une correction individuelle de caractéristique et de température spécifique de cette version de capteur, fonction qui serait rendue possible par l'adaptation directe de l'électronique au capteur et qui permettrait de simplifier la structure globale (voir ASIC CC400). Il reconnaît automatiquement un court-circuit et une coupure de câble éventuels au niveau du capteur et supprime les pointes de tension parasite qui peuvent apparaître sur le câble de sortie du capteur.

Le circuit ASIC active un capteur semi-différentiel à bague de court-circuitage sous la forme d'un diviseur de tension alternative (10 kHz), l'une des extrémités du diviseur étant alimentée sous amplitude constante. L'autre extrémité conduit une tension en phase inverse, dont l'amplitude fait l'objet d'une régulation jusqu'à ce que la tension de sortie disparaisse à la prise de sortie du diviseur de tension. L'amplitude d'alimentation régulée représente simultanément le signal de sortie analogique (figure 2, page suivante).

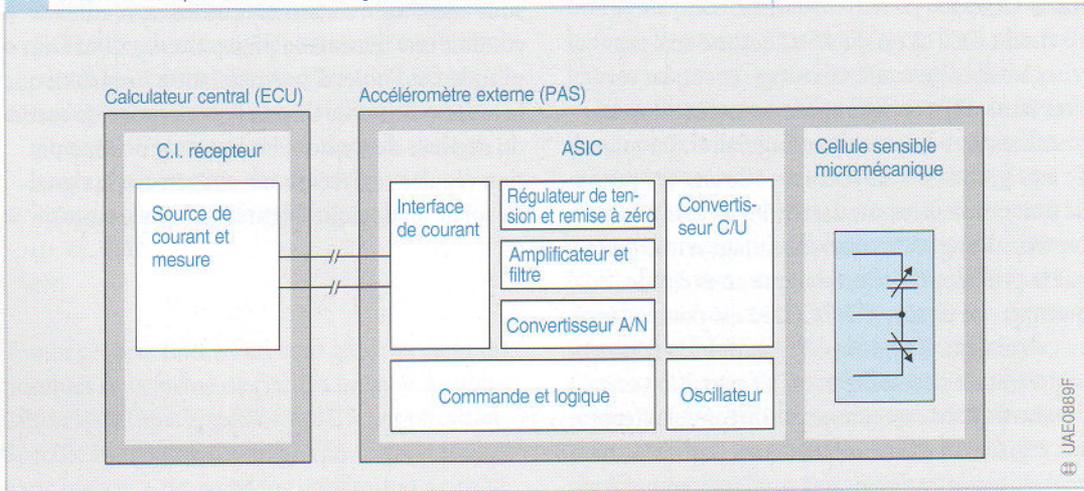
2 ASIC CC212 pour l'évaluation des signaux des capteurs à bagues de court-circuitage (intégration au calculateur).



3 ASIC CC195 pour l'évaluation des signaux des capteurs de cliquetis (intégration au calculateur).



4 Interface ASIC pour l'évaluation des signaux des accéléromètres (intégration au capteur).



ASIC CC195

Le circuit CC195 est un ASIC destiné aux capteurs de cliquetis. Les détecteurs de cliquetis sont fixés directement sur le bloc moteur, où ils saisissent les signaux d'accélération sous forme de bruits d'impact. Les signaux typiques de l'ordre de 5 à 15 kHz, qui sont générés en cas de combustion détonante, doivent être filtrés. Une commande à créneaux synchronisés en fonction du temps neutralise précisément la phase du cycle de travail au cours de laquelle le signal peut théoriquement apparaître et l'affecte même à un cylindre bien déterminé. Le signal, qui se manifeste dans la plage de fréquences critique, est redressé puis évalué après communication au calculateur. Ce dernier décale alors éventuellement le point d'allumage jusqu'à ce que le cliquetis disparaisse. Le circuit ASIC, qui réalise les fonctions précitées, est intégré au calculateur et peut exploiter les signaux transmis par quatre capteurs de cliquetis au maximum (figure 3).

Interface ASIC

Les capteurs d'accélération déclenchent les systèmes de retenue d'un véhicule, afin de protéger les passagers contre les conséquences d'une collision *frontale*. Ces capteurs sont logés dans le calculateur de commande des coussins gonflables, lequel est généralement placé dans la console du véhicule.

L'activation d'un système de protection contre un choc *latéral* devant se dérouler beaucoup plus

rapidement, il est nécessaire de positionner les capteurs d'accélération correspondants à la périphérie du véhicule (p. ex. sur les traverses). De là, ils transmettent leurs signaux numériques à la centrale de commande (ECU) via une liaison à deux conducteurs.

Un module électronique appelé PAS (Peripheral Acceleration Sensor), qui comprend l'accéléromètre capacitif ainsi que ses étages d'activation et d'évaluation – l'ensemble faisant partie d'un concept à deux puces –, assure la transmission des signaux (figure 4). Le circuit ASIC utilisé ne sert pas uniquement à l'activation du capteur et à l'exploitation de ses signaux, mais également au pilotage de l'interface de sortie et à l'autosurveillance du capteur.

ASIC CC340

Le circuit CC340 est amplificateur de signaux universel à commande numérique (figure 5, concept à trois puces). Ce module conçu en technologie CMOS constitue un amplificateur analogique différentiel de tension continue. En faisant appel à un circuit numérique de correction, il est en mesure de commander, en fonction d'un signal de température, le décalage (offset) et le niveau d'amplification.

Il convient p. ex. à l'amplification très précise de la tension de sortie du pont à jauges extensométriques d'un capteur de pression si la température de fonctionnement t du pont de mesure est aussi simultanément détectée. D'une part, les

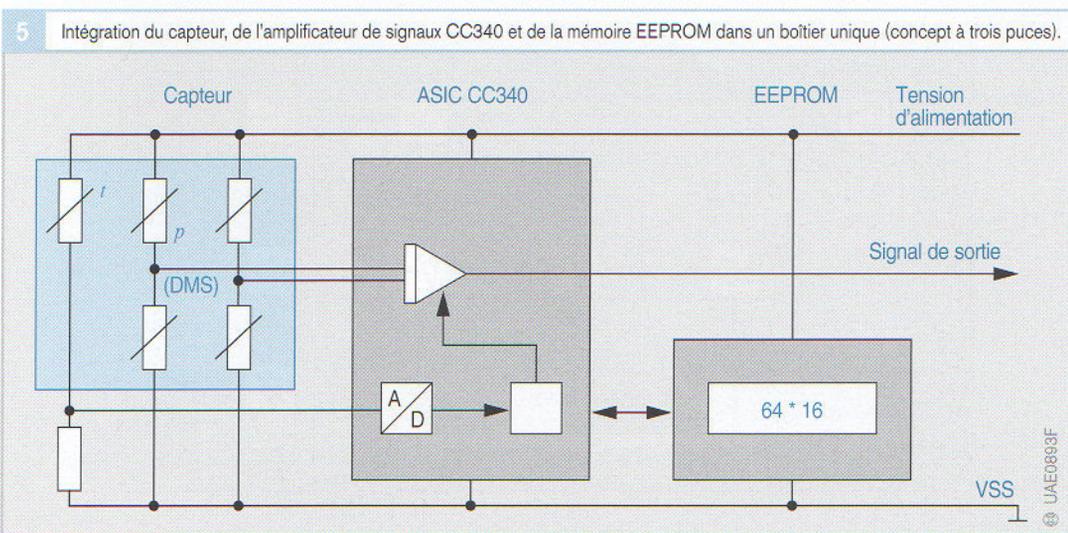


Figure 5

p pression
 t température

avantages d'une simple amplification numérique à large bande et exempte de temporisation sont ainsi conservés. D'autre part, la correction de température s'effectue dans une partie de circuit entièrement numérisée, à laquelle aucune exigence en matière de rapidité de fonctionnement ni de résolution n'est imposée.

La numérisation sommaire du signal de température est réalisée avec 6 bits (64 paliers). Le terme numérique permet la saisie, à partir d'une mémoire EEPROM, de deux fonctions de correction : l'une de décalage et l'autre de température. Chacune d'elles est codée avec 8 bits et peut être appliquée à l'amplificateur. Cette méthode permet donc de corriger les dérives de température qui divergent fortement de l'évolution linéaire. La mémoire EEPROM dispose également d'une amplification et d'un décalage de base sélectionnables.

Une nouvelle version de cet ASIC prévoit l'intégration de la mémoire EEPROM et du circuit de protection bipolaire dans une seule puce (figure 6). En accord avec le stade initial de la technique, la première version met encore en œuvre le concept à trois puces pour la réalisation des différentes fonctions.

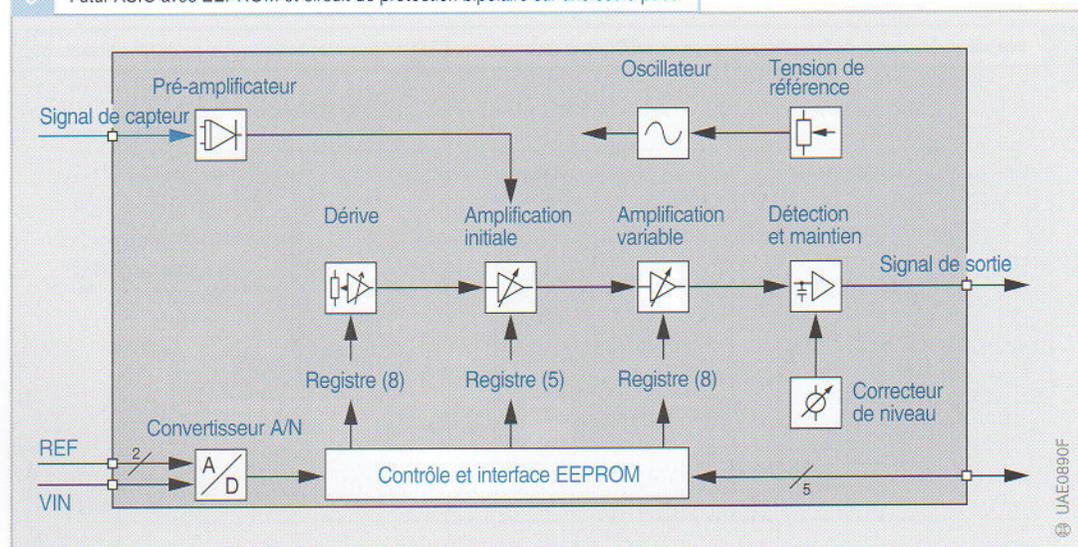
ASIC CC400

Le circuit CC400 permet l'évaluation numérique de capteurs inductifs au moyen d'une possibilité d'étalonnage et de correction spécialement adaptée au type de capteur (figure 7). Cet ASIC permet non seulement l'amélioration substantielle des propriétés des capteurs micromécaniques, mais aussi de celles des détecteurs macromécaniques (p. ex. capteurs inductifs ou capacitifs). Cet avantage résulte de l'intégration de l'électronique et de la simplification parallèle des capteurs.

L'inductance L d'un capteur de déplacement ou de position angulaire ainsi que sa température de fonctionnement – mesurée à l'aide d'un capteur CTN – sont converties par un circuit auto-oscillant très simple en une période, paramètre facilement digitalisable. A partir de ces deux valeurs, le paramètre de mesure correspondant est déduit quasiment sans erreur d'une table de recherche bidimensionnelle.

Afin d'économiser les emplacements de mémoire, seul un petit nombre de valeurs est mémorisé sur l'ASIC. En cas de besoin, l'ASIC effectue une interpolation linéaire entre ces différentes valeurs. Les valeurs du tableau sont calculées par un procédé de calibrage unique et déposées dans la mémoire (EE)PROM de l'ASIC. La durée totale de mesure et de calcul est inférieure à 0,5 ms.

6 Futur ASIC avec EEPROM et circuit de protection bipolaire sur une seule puce.

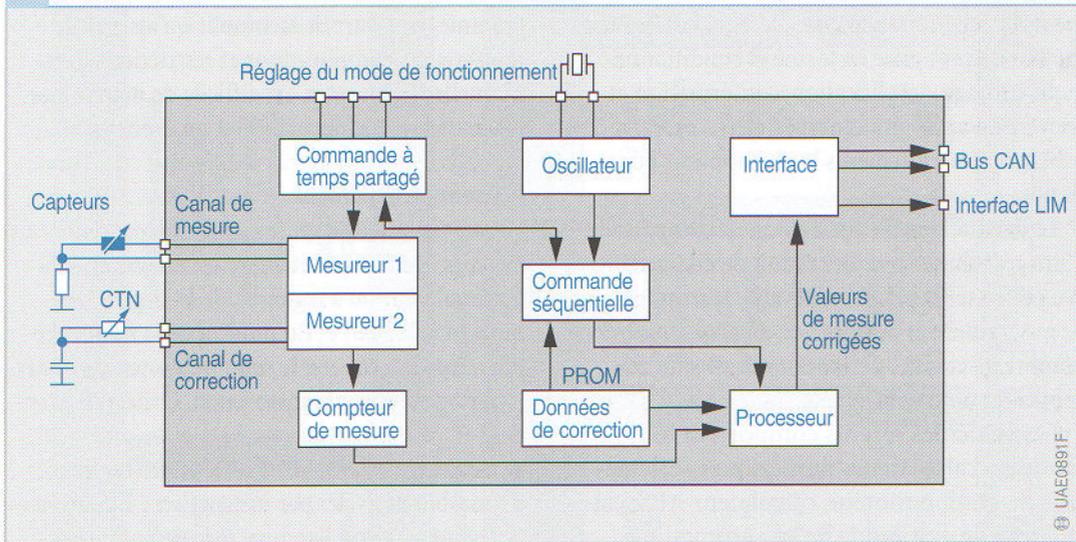


La correction précitée de la valeur de mesure permet de renoncer, p. ex. sur les capteurs à bague de court-circuitage, au contour linéarisant du noyau feuilleté en fer doux ainsi qu'à un second système de référence à étalonnage fixe. Cela se traduit par une certaine simplification du capteur. Par rapport au mode d'évaluation conventionnel, le circuit CC400 permet toutefois une nette amélioration de la sensibilité de détection de l'ordre de 0,1 % de l'étendue de mesure sur l'ensemble de la plage de température. La tenue au vieillissement du capteur de déplacement/

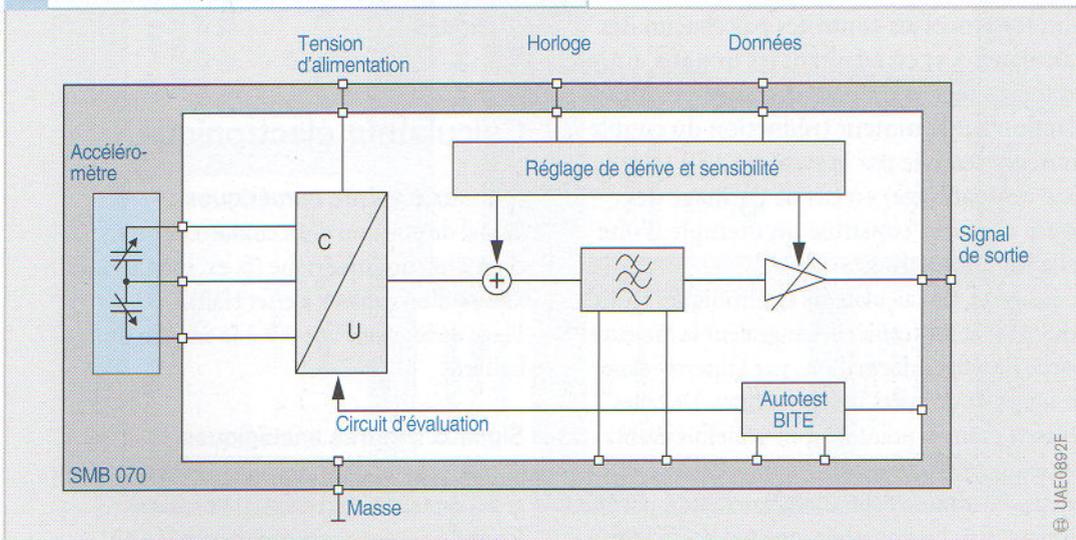
position angulaire et de la sonde de température correspondante constitue la seule restriction de principe.

La figure 8 montre l'exemple d'un capteur d'accélération capacitif avec son circuit d'évaluation.

7 Circuit ASIC CC400 intégralement numérisé pour l'évaluation rapide de capteurs inductifs, à correction ciblée des erreurs de caractéristique et de température à l'aide d'un signal de sortie numérique ou à largeur d'impulsion modulée.



8 Accéléromètre capacitif et circuit d'évaluation SMB070 (exemple).



Informatique automobile

Exigences

Les exigences en matière de fonctionnalités, sécurité, confort et compatibilité avec l'environnement, imposées aux multiples sous-systèmes présents sur les véhicules automobiles, obligent à mettre en œuvre des concepts de commande et de régulation à la pointe du progrès. Un calculateur électronique met en forme les grandeurs de commande et de régulation saisies par les capteurs et génère les signaux destinés à piloter les actionneurs. Les signaux d'entrée peuvent être de type analogique (p. ex. le signal émis par un capteur de pression), numérique (p. ex. le signal d'état d'un contacteur) ou impulsionnel (autrement dit échantillonné, p. ex. le signal de régime moteur). Après mise en forme et conditionnement (filtrage, amplification, conformation et conversion analogique/numérique), ces signaux subissent des traitements le plus souvent numériques.

La technologie des semi-conducteurs permet d'intégrer sur un nombre réduit de composants des calculateurs performants avec leurs mémoires de programme et de données, ainsi qu'un certain nombre de circuits périphériques affectés aux applications en temps réel.

Les véhicules récents comportent toujours plusieurs calculateurs numériques (calculateur de gestion moteur, calculateur ABS, calculateur de gestion de boîte automatique, etc.). Des performances accrues et des fonctions nouvelles sont obtenues en synchronisant les processus contrôlés par chacun des calculateurs et en adaptant les uns aux autres, en temps réel, leurs paramètres respectifs. L'action sur le moteur (réduction du couple moteur) réalisée par le système ASR (régulation antipatinage) en cas de patinage des roues motrices constitue un exemple d'une telle fonctionnalité.

Jusqu'ici, les calculateurs électroniques (p. ex. ABS/ASR et Motronic) échangeaient la majeure partie de leurs informations par l'intermédiaire de lignes de données indépendantes. De telles liaisons point-à-point ne sont toutefois avantageuses qu'en présence d'un nombre limité de signaux. Lorsque le débit de signaux est important, comme dans l'automobile, une topologie réseau

simple, spécialement adaptée à l'échange sériel de données entre calculateurs, permet d'obtenir de bien meilleurs résultats.

Micro-ordinateur

Un micro-ordinateur comporte, outre l'unité centrale (CPU) dédiée aux opérations arithmétiques et logiques, des modules fonctionnels spécifiques, chargés de saisir des signaux externes et de générer les signaux destinés aux actionneurs. Ces modules périphériques assurent de façon autonome un certain nombre de tâches en temps réel que l'unité centrale, commandée par programme, ne pourrait accomplir qu'au prix de nombreuses complications et restrictions fonctionnelles (il lui est p. ex. difficile de déterminer l'instant précis d'apparition d'un événement).

Puissance de calcul

La puissance d'une unité centrale dépend de trois facteurs : de son architecture (p. ex. structure à accumulateur ou à registre), de la largeur des mots (4 à 32 bits) et du produit de la fréquence d'horloge interne par le nombre moyen de cycles d'horloge requis par instruction. Ordres de grandeur :

- fréquence d'horloge : 1 à 40 MHz (typique),
- nombre de cycles par instruction : 1 à 32 cycles (typique) selon l'architecture de l'unité centrale et la nature de l'instruction (p. ex. 6 cycles pour une addition et 32 cycles pour une multiplication).

Calculateur électronique

Signaux d'entrée numériques

Signal de position d'un contacteur ou signal d'un capteur numérique (p. ex. impulsions de vitesse d'un capteur à effet Hall).

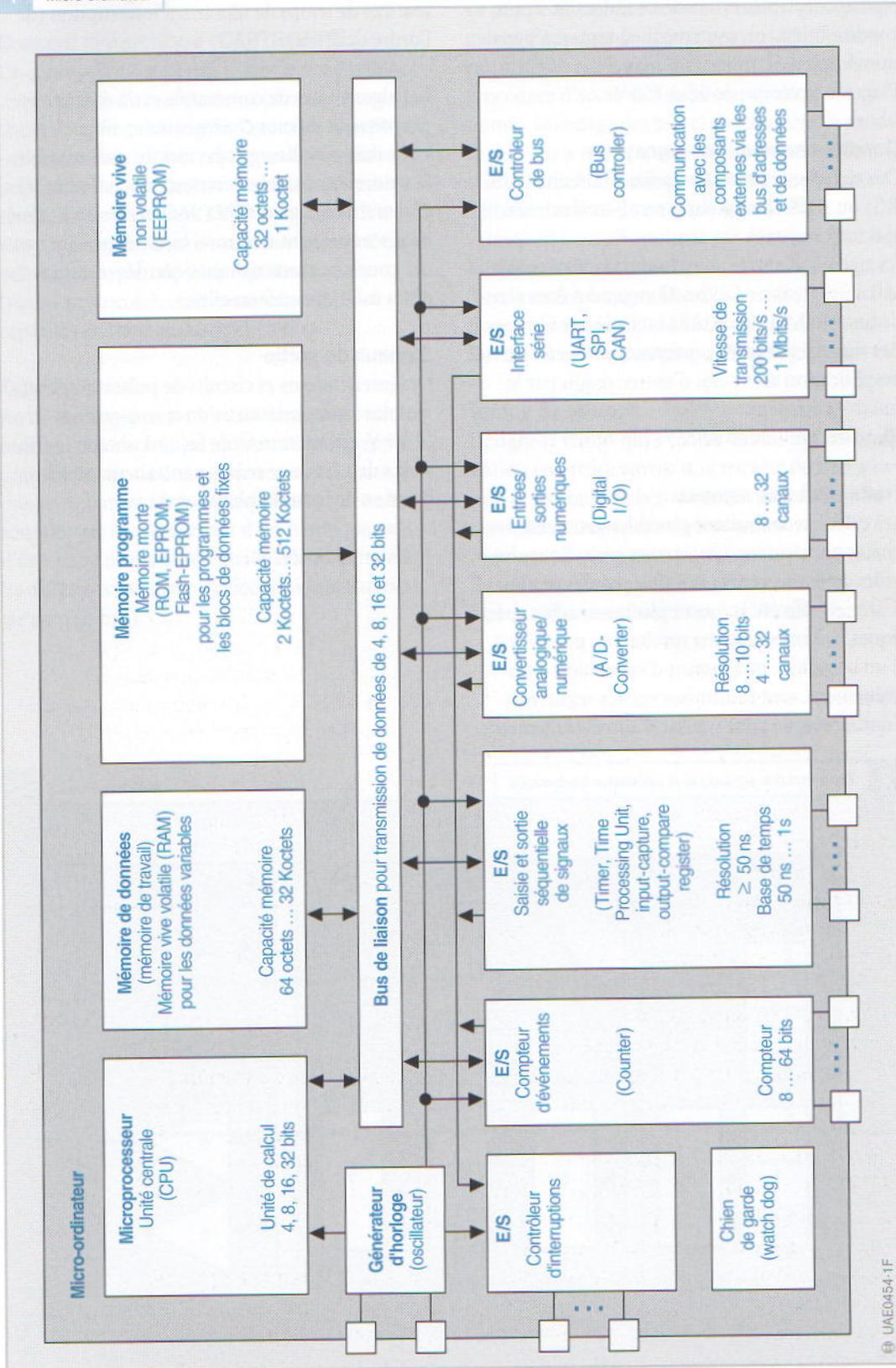
Plage de tensions : de 0 V à la tension de la batterie.

Signaux d'entrée analogiques

Signaux de capteurs analogiques (sonde à oxygène, capteur de pression, potentiomètre).

Plage de tensions : de quelques mV à 5 V.

1 Micro-ordinateur



Signaux d'entrée impulsionnels

Signaux de capteurs de vitesse inductifs. Après conditionnement, traitement en tant que signal numérique.

Plage de tensions : de 0,5 à 100 V.

Conditionnement des signaux

Des circuits de protection passifs (circuits R ou RC) ou actifs (composants semi-conducteurs spéciaux résistant aux tensions élevées) limitent les signaux d'entrée aux niveaux de tension admissibles (tension de fonctionnement du micro-ordinateur). Le signal utile est isolé par filtrage des signaux parasites superposés et amené par amplification au niveau d'entrée requis par le micro-ordinateur.

Plage de tensions : 0 à 5 V.

Traitement des signaux

Les calculateurs traitent généralement des signaux numériques. Les signaux périodiques rapides en temps réel sont traités par des modules matériels affectés à une ou plusieurs tâches spécifiques. Les informations résultantes, p. ex. l'état d'un compteur ou l'instant d'apparition d'un événement, sont transmises via des registres à l'unité centrale pour y subir d'autres traitements.

Cette solution réduit nettement les exigences en matière de temps de réponse d'interruption (de l'ordre de la ms).

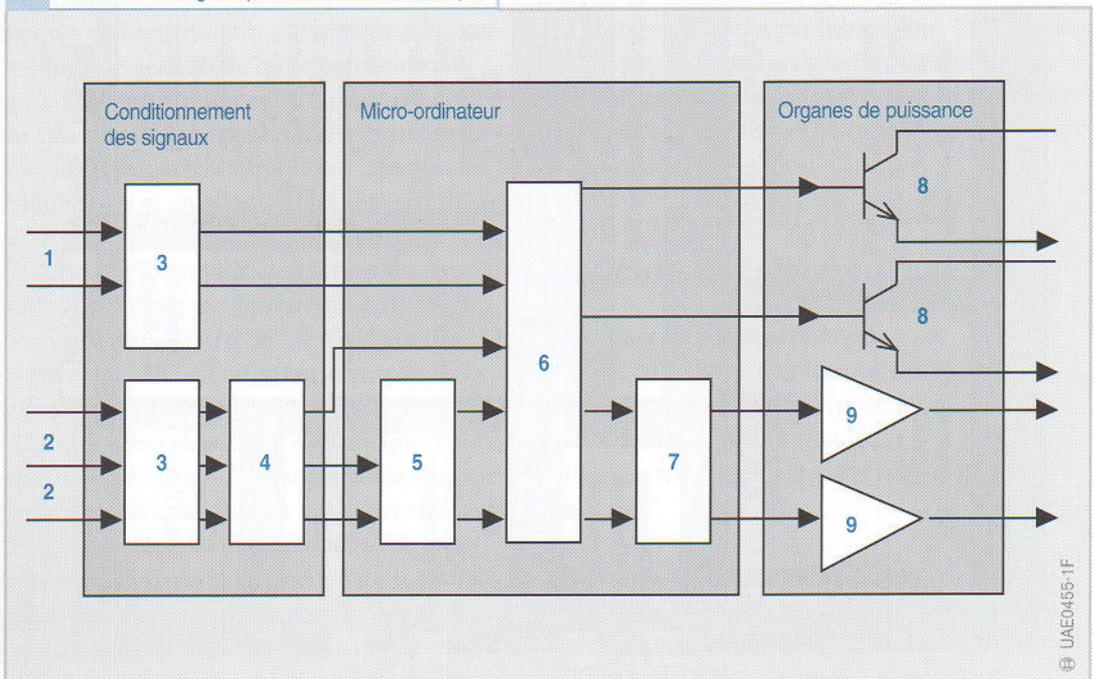
Les algorithmes de commande et de régulation proprement dits sont enregistrés en mémoire.

Le micro-ordinateur permet de réaliser, selon la nature des données, un nombre quasi illimité d'opérations logiques. Les données traitées et mémorisées peuvent être aussi bien des paramètres, des courbes caractéristiques que des cartographies multidimensionnelles.

Signaux de sortie

Des interrupteurs et circuits de puissance amplifient les signaux de sortie du micro-ordinateur (0 à 5 V, quelques mA) de façon à obtenir les niveaux de puissance requis par les actionneurs (tension de batterie, plusieurs A).

2 Traitement des signaux par le calculateur électronique.



Système global

Concept hiérarchique (CARTRONIC)

Ce concept consiste à subdiviser le système électrique global d'un véhicule en plusieurs sous-systèmes de taille raisonnable. Les unités fonctionnellement liées (unités échangeant un nombre important de données) sont réunies en un sous-réseau. Le concept CARTRONIC conduit à une structuration en sous-réseaux parfaitement équivalents sur le plan de l'échange de données (même protocole), mais caractérisés par des capacités de transmission différentes.

Topologie

Au niveau logique, tous les systèmes de communication automobile les plus connus font appel, pour l'échange de données inter-calculateurs, à une seule liaison série. Matériellement, cette liaison série est constituée soit d'un fil unique, soit d'une paire de fils différentielle reliant entre eux les différents calculateurs électroniques (topologie de type bus).

Protocole

Le protocole désigne l'ensemble des règles qui régissent l'échange de données entre les différents calculateurs reliés à un même bus. Il définit la procédure d'accès au bus, la constitution des trames, le codage des bits et des données, le mode de détection et de gestion des erreurs, de même que le moyen de localiser toute station du bus défectueuse (bus de multiplexage CAN).

Vitesse de transmission

Bus de multiplexage : 10 à 125 kbits/s.

Bus de transmission : 125 kbits/s à 1 Mbit/s.

Bus de télécommunication : 10 à 125 kbits/s.

Temps de latence

Désigne le temps qui s'écoule entre l'instant où la station émettrice envoie une requête de transmission et l'instant où la station réceptrice reçoit le message correspondant, sans erreur.

Bus de multiplexage : 5 à 100 ms.

Bus de transmission : 0,5 à 10 ms.

Bus de télécommunication : 5 à 100 ms.

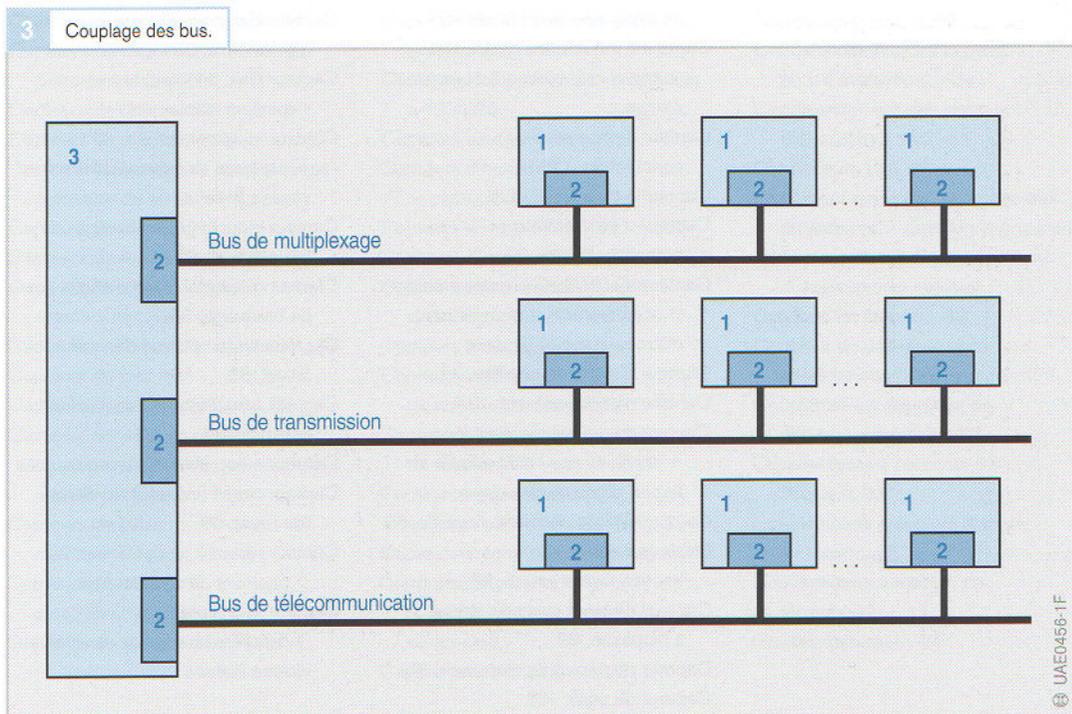


Figure 3

- 1 calculateur
- 2 contrôleur de bus
- 3 coupleur de bus (passerelle).