

préambule

Ce chapitre est consacré à un domaine en pleine expansion, celui des capteurs pour l'automobile qui représentent environ un tiers du marché mondial des capteurs. Aujourd'hui une voiture moyenne comporte environ 50 capteurs, dont plus du tiers relèvent des micro technologies, ce nombre peut dépasser 100 capteurs dans les grandes berlines de luxe. Précisons que ces capteurs sont le plus souvent soumis à des conditions d'environnement très dures: les températures peuvent varier de -40 à +1100°C, les pressions atteignent parfois 2000 bars, et il y a de nombreux cycles thermiques, de l'humidité, du sel et divers aérosols et de multiples chocs et vibrations à supporter. Les temps de réponse demandés sont souvent courts (20ms maxi pour un airbag) et le taux de pannes doit être très réduit (10^{-9} pour une durée de vie d'une quinzaine d'années). En outre les constructeurs apprécient les dispositifs peu coûteux, de faibles dimensions, légers, disposant de la possibilité d'autotests.

Bien sûr ces capteurs ne sont pas isolés mais intégrés dans des microsystèmes **spécifiquement développés pour l'automobile**. En particulier il faut signaler qu'aux contraintes précisées ci-dessus s'ajoutent celles liées à la sécurité. Les principaux microsystèmes automobiles vont contrôler le freinage, le fonctionnement du moteur où la pression des pneus, etc...Il est donc indispensable qu'ils soient en état de bon fonctionnement, en permanence, quel que soit l'environnement, parfois électriquement très bruité, où se trouve le véhicule. Chacun a pu constater que son téléphone portable ne fonctionne pas correctement partout, en ce qui concerne les dispositifs automobiles **ils doivent fonctionner partout** et répondre donc à des spécifications très strictes (standard 61508 SIL3) définies par l'IEC (the International Electrotechnical Commission).

Nous nous intéresserons essentiellement à trois aspects en les illustrant de manière non exhaustive par un ou deux exemples typiques:

- le **contrôle de combustion**, dont l'intérêt est évident dans le contexte mondial de lutte contre la pollution atmosphérique
- la **sécurité et l'aide au pilotage** qui constituent le second domaine prometteur en terme de recherche et pour lequel de gros investissements sont consentis sans qu'il n'y ait encore beaucoup de réalisations concrètes
- et ce que nous avons regroupé sous le terme de gadgets, en ce sens qu'il s'agit d'**éléments de confort**, de plus en plus appréciés des automobilistes et qui voient leur implantation se développer fortement dans les véhicules et impliquent souvent des solutions innovantes.
- et enfin un aperçu des évolutions à plus long terme.

Il va de soi que nous cherchons à présenter ici un état de l'art tel que les constructeurs le voient à court terme mais que les choses vont être profondément bouleversées d'ici quelques années, remettant totalement en question les concepts actuels de véhicule à moteur. **En effet nul ne devrait plus ignorer que les réserves pétrolières sont limitées et en voie ultra rapide d'épuisement, d'une part, et que le réchauffement climatique et ses effets catastrophiques à moyen terme, d'autre part, impliquent une révision drastique des concepts qui ont prévalu au 20ème siècle.** Les économistes qui, chacun peut le constater à longueur d'année, ne sont que des experts de l'erreur de prévision économique, nous prédisaient il y a quelques décennies des avènements merveilleux et ont imposés leur vision complètement irréaliste aux gouvernants dont le slogan "gouverner c'est prévoir" semble bien dépassé. En conséquence on a basé tout le développement sur un libéralisme forcené avec délocalisation et **consécutivement** multiplication à l'absurde des transports routiers et aériens

Aujourd'hui les vrais spécialistes (les géologues) constatent que depuis dix ans on n'a pas découvert de réserve miraculeuse nouvelle de pétrole et les statisticiens viennent de comprendre que la CHINE avait plus de 1.3 milliards d'habitants qui aspiraient à un mode de vie à l'américaine et dont le pouvoir d'achat était globalement en forte hausse : 12% par an (c'est à dire en très forte croissance pour une grosse minorité et stationnaire pour les autres: et grosse minorité à l'échelle de la CHINE ça représente plusieurs centaines de millions de personnes) ce qui se traduit par des achats de pétrole au Moyen Orient en très forte croissance. La production ne pouvant augmenter indéfiniment et les

réerves étant limitées les géologues ont donc abouti à la conclusion logique suivante : si l'évolution de ces cinq dernières années se poursuit, dans moins de cinq ans on aura atteint la capacité de production **maximale** et ensuite, du fait de l'épuisement progressif de certains gisements, celle-ci ne pourra que décroître alors que la demande continuera à vouloir augmenter. Il n'est guère besoin d'être politologue pour comprendre que l'on va droit dans le mur et que les tensions inflationnistes considérables qui vont en résulter concerneront avant tout les pays **semi-riches**, c'est à dire l'Europe, et dans une moindre mesure le Japon (les Etats-Unis seront moins touchés grâce à l'utilisation de leur puissance militaire à leur seul profit dans la zone du golfe persique) avec une multiplication du prix de l'énergie par des nombres à deux chiffres (imaginez que dans trois ans le prix du gasoil soit de deux ou trois euros le litre : ce n'est pas une utopie, mais un risque très probable et réfléchissez à l'ensemble des conséquences que cela va entraîner. Il serait grand temps de réfléchir messieurs les gouvernants au lieu de faire les autruches!).

La conséquence est qu'il faut dès aujourd'hui rechercher comment économiser l'énergie pétrolière et surtout comment changer d'énergie. Les chapitres traitant de prospective automobile sont donc d'un intérêt gigantesque pour essayer d'appréhender les évolutions futures qui ne verront cependant le jour que si les moyens de la recherche sont suffisants : **ce qui n'est absolument pas le cas aujourd'hui** où l'on mise sur des avions gigantesques qui seront cloués au sol quand ils sortiront de chaîne faute de kérosène (ou de clients suffisamment fortunés pour payer le prix des billets...).

contrôle de combustion

Le moteur thermique qu'il soit à essence ou à gazole est basé sur la combustion d'un carburant en présence d'air, combustion dont les conditions sont très difficiles à contrôler puisque le régime du moteur est éminemment variable. A titre indicatif nous donnons ci-dessous quelques éléments d'information pour comprendre les enjeux du problème.

Le premier tableau concerne des moteurs anciens (milieu des années 80) et correspond **aux idées reçues véhiculées par les médias (plus de 20 ans plus tard!)** : à savoir que le moteur diesel pollue plus que le moteur à essence. Aujourd'hui la réalité est sensiblement différente, il y a moins d'imbrûlés et d'aldéhydes dans le moteur diesel et pratiquement plus de suies avec les nouveaux pots catalytiques, simultanément l'élimination du soufre dans le gazole (grâce à la réglementation européenne) a permis d'éliminer les SOx, par contre le moteur à essence s'il ne génère plus de dérivés du plomb génère dorénavant plus d'aldéhydes et d'imbrûlés qu'autrefois. Toutefois une nouvelle polémique voit le jour actuellement (en fin 2006) car selon certains biologistes les pots catalytiques favoriseraient la production d'oxydes d'azote lesquels seraient les précurseurs de la pollution à l'ozone. N'ayant à ma disposition aucun chiffre sérieux à ce sujet (c'est à dire corroborant une augmentation sensible de la pollution par NOx qui dépasserait celle résultant de l'accroissement de la circulation) je me bornerai à constater que la production d'oxydes d'azote en sortie de pots d'échappement n'est pas une nouveauté ainsi qu'en témoigne le tableau ci-dessous.

polluant	moteur à essence				moteur diesel			
	ralenti	accél	croisière	décél	ralenti	accél	croisière	décél
CO	xxx	xx	x	x	0	0	0	0
imbrulés	xx	x	x	xx	xx	x	x	xxx
aldéhydes	x	x	x	0	xx	x	x	xx

NOx	x	xx	x	x	x	xx	x	x
SOx	0	0	0	0	x	x	x	x
dérivés du Pb	x	x	x	x	0	0	0	0
suies	x	x	x	xx	xx	xxx	xx	xx
odeurs	x	x	x	xx	xx	xx	xx	xx

Le second tableau correspond à une statistique effectuée sur plus de 1000 moteurs de chaque type. Il s'agit là de moteurs récents avec pots catalytiques ayant plus de 10000 kms. On constate que le moteur diesel qui consomme à puissance égale sensiblement 30% de carburant en moins que le moteur à essence se révèle bien plus intéressant que ce dernier, non seulement pour le portefeuille de son propriétaire mais aussi pour l'environnement puisque toutes les valeurs moyennes sont inférieures y compris le pourcentage de CO2 responsable de l'effet de serre. Les valeurs correspondent à des moteurs de même puissance bien évidemment et examinés dans les mêmes conditions.

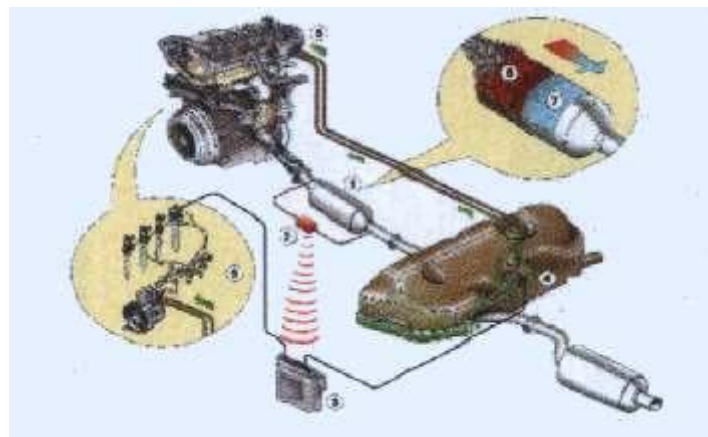
Polluant	moteur essence récent			moteur diesel récent		
	max	min	moy	max	min	moy
CO2	15.0	2.7	9.0	10.0	0.5	5.0
CO	13.5	0.2	4.0	5.4	0	0.07
O2	17.4	0	4.0	14.0	0.35	6.3
H2	5.8	0	2.0	1.8	0	0.02
HC	4.0	0	0.5	0.35	0	0.015
aldéhydes	0.03	0	0.004	0.003	0	0.0015
NOx	0.20	0	0.06	0.1	0	0.03
SO2	0.008	0	0.006	0.002	0.007	0.0015

Ce tableau issu de travaux français permet de mettre en évidence que les gaz d'échappement sont multiples et en concentration très fluctuante d'un véhicule à l'autre et, pour un même véhicule, selon la situation de **conduite**. La lecture de ce document appelle donc quelques commentaires:

- ce tableau comporte deux types d'information, en partie haute une comparaison entre moteur à essence et moteur diesel dans divers cas de fonctionnement, ce tableau compare des moteurs anciens, sans pot catalytique. Il convient donc de réviser fortement à la baisse les zones encadrées.
- le second tableau compare sur des moteurs récents les compositions volumiques des gaz d'échappement. Il convient cependant pour être totalement objectif de se rappeler que le moteur

diesel consomme environ 30% de carburant en moins que le moteur à essence de puissance équivalente, ce qui revient à dire que les volumes de gaz d'échappement sont environ 30% moindre et que pour être réellement comparatif il aurait donc fallu multiplier par 0.7 les valeurs du tableau diesel.

- précisons que la colonne min correspond à un moteur fonctionnant dans les conditions optimales et que malheureusement au cours de cet essai ce fut un cas rarissime.
- la conséquence de ces travaux c'est évidemment d'avoir mis en évidence que la pollution atmosphérique due au diesel est très sensiblement moindre que celle d'une voiture à essence de même puissance, et ce pour toutes les catégories de polluants et malgré le sérieux de ces travaux universitaires les officiels français continuent à distiller des informations erronées sur la soit-disant pollution du diesel
- le seul élément sur lequel se basent les détracteurs du diesel est l'émission de fumées noires (donc de microparticules) lors de l'accélération. Ceci est vrai pour des moteurs très anciens qui vont progressivement disparaître, mais ne l'est plus pour les moteurs HDi récents équipés de pots catalytiques qui éliminent totalement les particules.



Notons d'ailleurs que nombre de moteurs à essence anciens crachent aussi des particules de suie, et souvent des microgouttelettes d'huile à chaque changement de régime (fumée bleue). Notons en outre que les moteurs diesel les plus polluants sont ceux des poids lourds dont les réglages et l'âge sont souvent anciens (et je ne parle pas seulement des camions bulgares, d'une autre époque, qui sillonnent l'Europe sans le moindre contrôle).

- Il est cependant évident que pour les deux types de moteur l'optimisation du fonctionnement doit être une préoccupation permanente chez tous les constructeurs et devrait aussi être une préoccupation des conducteurs. Malheureusement ce n'est, sauf cas exceptionnel dont je fais évidemment partie, pratiquement jamais le cas puisque la majorité des automobilistes ne se préoccupent que d'une seule chose : doubler la voiture qui précède. Et qu'ils ne comprennent pas que, quelle que soit leur vitesse, ils ne gagneront pratiquement pas de temps globalement et que leur moyenne annuelle restera de l'ordre de 50km/h. J'aimerais rappeler que lorsqu'on conduit idiotement pied au plancher on doit freiner souvent de la même manière et que ça se traduit par une consommation accrue et une pollution très accrue, mais aussi que l'on doit passer à la pompe plus souvent et y **perdre du temps plus souvent**. Je préfère avoir le pied plus régulateur, éviter d'accélérer inutilement pour éviter de freiner 100m plus loin et voir ma consommation rester en dessous des normes officielles de mon véhicule alors que pour la majorité des automobilistes elle est sensiblement au dessus. Pour être précis mon véhicule est donné pour une consommation moyenne de 7.8l/100km, en 127000km ma consommation s'est établie à 6.0l/100km tandis que mon garagiste m'assure que pour la plupart de ses clients équipés de la même voiture elle s'établit entre 8,5 et 10

l/100km. Cherchez l'erreur. Je roule pourtant à environ 130km/h (réels) sur autoroute et 90km/h sur les autres routes. Additif 2010 : avec mon nouveau véhicule équipé du même moteur ma consommation est tombée à 5,1l/100km.

L'objectif d'optimisation de la combustion est à la fois multiple et difficile à atteindre. Il s'agit:

- de réduire la consommation de carburant
- de réaliser à un instant donné le mélange optimal carburant-oxygène
- d'obtenir en sortie du pot d'échappement un minimum de sous produits polluants
- d'identifier simultanément l'état d'usure des composants du moteur.

Pour cela il convient de développer en particulier des capteurs chimiques, et actuellement beaucoup de recherches concernent le développement de capteurs ampérométriques multiélectrodes à l'état solide.

capteur d'oxygène

Rappelons l'existence d'un capteur ampérométrique d'oxygène exploité par tous les garagistes et basé sur l'emploi d'une céramique poreuse à base de ZrO_2 dont le principe est rappelé sur la figure. Le courant est directement fonction du nombre de molécules d'oxygène (c'est à dire de la pression partielle d' O_2) qui traversent la barrière de diffusion constituée par l'électrode et de la géométrie du canal d'amenée des gaz.

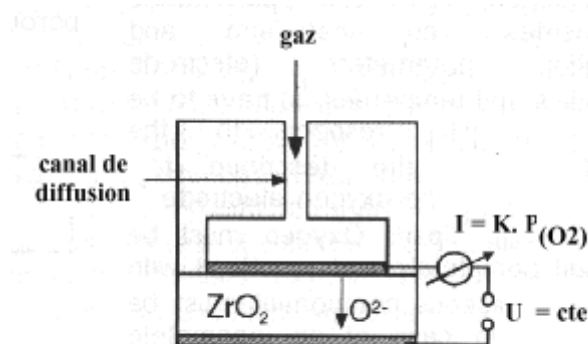
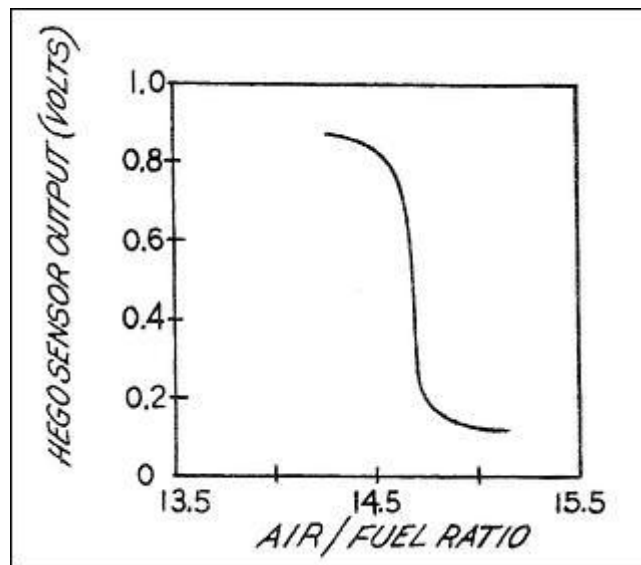


Fig. principe d'un capteur ampérométrique d'oxygène

Ce capteur d'oxygène est maintenant introduit sur les véhicules à essence depuis une quinzaine d'années et porte le nom de **sonde lambda**. En contrôlant la quantité d'oxygène dans les gaz d'échappement il permet d'avoir instantanément une indication du rapport air/carburant dans le moteur et va servir au calculateur pour piloter l'injection et maintenir un rapport voisin de 14.7/1 quasiment stœchiométrique. Dans ces conditions, les émissions néfastes sont réduites au maximum et le pot catalytique travaille dans les meilleures conditions, dans la mesure où les constantes de temps de tous les éléments de la chaîne de contrôle sont suffisamment faibles, ce qui est malheureusement rarement le cas.

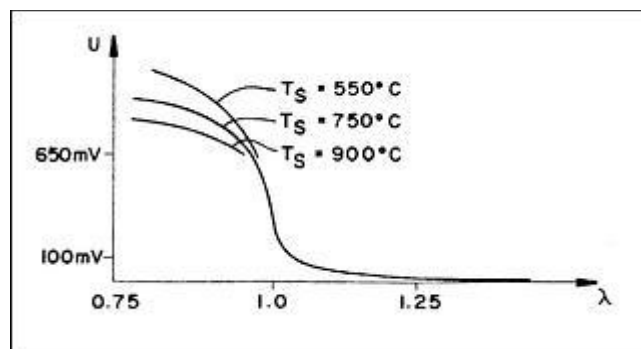


Notons que cette sonde lambda est optimisée pour fonctionner autour de ce rapport optimal et que sa sensibilité varie fortement et non linéairement ainsi que le montre le graphique ci-dessous



réponse d'une sonde lambda (courtesy Ford Motor Company)

Simultanément la tension de sortie d'une sonde lambda est aussi dépendante de la température. A trop faible température elle ne fonctionne plus car la céramique (oxyde de zirconium) est insuffisamment conductrice. Ainsi au démarrage du moteur c'est évidemment le risque, c'est pourquoi une résistance chauffante est insérée dans la sonde (elle ne sera alimentée que tant que le moteur n'est pas à son régime normal en température, ensuite ce seront les gaz d'échappement qui vont maintenir le capteur en température). Nous donnons à titre indicatif, pour la même sonde Bosch, sa dépendance de la température dans le diagramme ci-dessous, dans lequel λ est le rapport entre le ratio air/carburant réel et le ratio optimal.



En outre la température, toujours en raison de son influence sur la conductivité de la zircone, a une influence sur le temps de réponse qui sera d'environ 50ms à 600°C, ce qui est satisfaisant, à plusieurs secondes à 350°C ce qui ne l'est évidemment plus du tout si l'on veut optimiser le fonctionnement du moteur.

En conclusion on notera que la sonde lambda est loin d'être un dispositif satisfaisant.

capteur multi électrodes pour NOx et les hydrocarbures

La sonde à oxygène est imparfaite, mais elle a cependant le mérite d'exister et on a cherché à en élargir l'usage en bâtissant autour de son principe d'autres capteurs de gaz.

Ainsi à partir de ce même principe on a imaginé un capteur multi électrodes : la première partie du capteur est semblable au capteur précédent, puis dans la seconde zone c'est le NO qui est réduit. Un choix convenable de la géométrie, de la nature des électrodes et de la tension appliquée U_1 fait que tout l'oxygène libre dans le gaz est réduit, mais pas du tout le NO, au niveau de la première électrode. Alors au niveau de la seconde électrode, il restera uniquement NO qui sera réduit et c'est l'oxygène du NO qui donnera le courant I_2 . Le même principe peut-être exploité pour identifier les hydrocarbures imbrûlés.

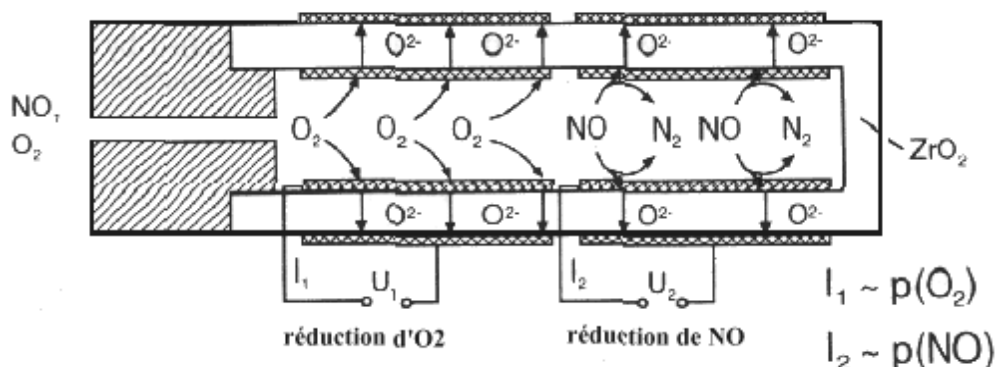


Fig. capteur multi électrodes (Götz)

Ce dispositif peut fonctionner de nombreuses heures à des températures atteignant $600^\circ C$. Il reste à trouver le meilleur compromis entre temps de réponse, géométrie, choix des électrodes et de leur technologie de réalisation (couches épaisses vraisemblablement) et durée de vie pour passer à une implantation systématique dans les pots d'échappement des voitures. Les électrodes sont classiquement en platine sur les sondes des garagistes, mais il semble que l'on s'oriente vers l'utilisation du chromite de lanthane dopé au Ga qui semblerait avoir une excellente durée de vie et présenterait une meilleure fiabilité que le platine.