

Principe de fonctionnement de la sonde Lambda



Les sondes Lambda se présentent sous deux types, différenciés par le métal précieux de l'élément qui permet de mesurer la teneur en oxygène des gaz d'échappement.

Sonde Lambda au Zirconium :

La face externe de l'élément en dioxyde de zirconium est au contact direct des gaz d'échappement. La face interne est en contact avec l'air. Les deux faces de l'élément sont revêtues d'une fine couche de platine. Les ions oxygène traversent l'élément et laissent une charge positive sur la couche de platine. La couche de platine fait office d'électrode ; ce signal spécial est transmis de l'élément au fil de connexion du capteur. L'élément au dioxyde de zirconium devient conducteur des ions oxygène à partir d'une température d'environ 300 C. Quand la concentration d'oxygène diffère entre l'une et l'autre face de l'élément au dioxyde de zirconium, il se produit une tension en raison des propriétés particulières de l'élément. En présence d'un mélange carburant/air pauvre, une tension est faible, et en présence d'un mélange carburant/air riche, la tension est élevée.

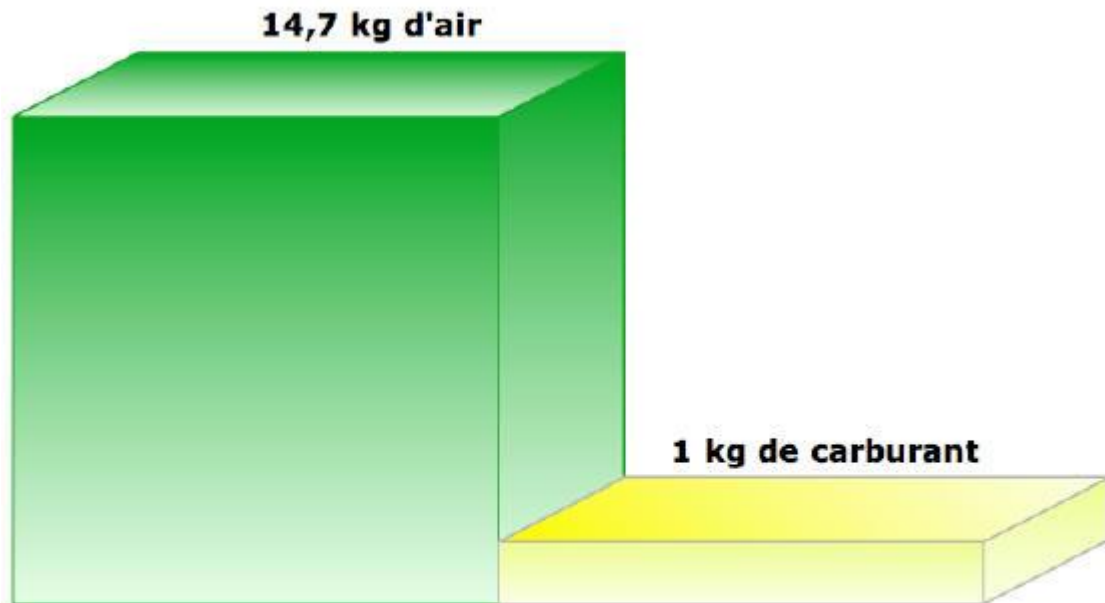
Le saut typique de tension se produit sous un rapport air/carburant d'environ 1/14.7. ($\lambda = 1$ correspond au ratio air/carburant de 1/14.7, c'est-à-dire à une combustion complète). D'où le nom de sonde Lambda. Le régulateur de mélange du système de commande du moteur gère le rapport air/carburant. À cet effet, la sonde Lambda fournit les informations nécessaires au système de commande moteur. Le capteur est actif seulement quand la température de 300 C est atteinte dans le pot d'échappement. Il faut donc un certain temps après le démarrage pour que l'élément de la sonde soit réchauffé par les gaz d'échappement. Aujourd'hui, les sondes, pour la plupart d'entre elles, sont équipées d'un élément interne de chauffage en céramique qui permet de réduire le délai de latence du capteur.

Sonde Lambda au dioxyde de titane :

L'élément au dioxyde de titane ne génère pas de tension électrique comme le fait l'élément au dioxyde de zirconium. En revanche, la résistance électrique de l'élément au dioxyde de titane varie en relation avec la concentration d'oxygène dans les gaz d'échappement. Si λ est différent de 1, on note une variation significative de la résistance. La tension de sortie change en fonction de la concentration d'oxygène dans les gaz d'échappement. Contrairement au capteur au dioxyde de zirconium, le capteur au dioxyde de titane ne demande pas un air de référence car son principe de fonctionnement est différent. C'est pour cela aussi que les dimensions du capteur au dioxyde de titane sont plus réduites. Les sondes au dioxyde de titane et les sondes au dioxyde de zirconium ne sont pas interchangeables parce que, non seulement elles diffèrent par leurs dimensions, mais aussi par les stratégies de contrôle utilisées pour évaluer le signal de la sonde.

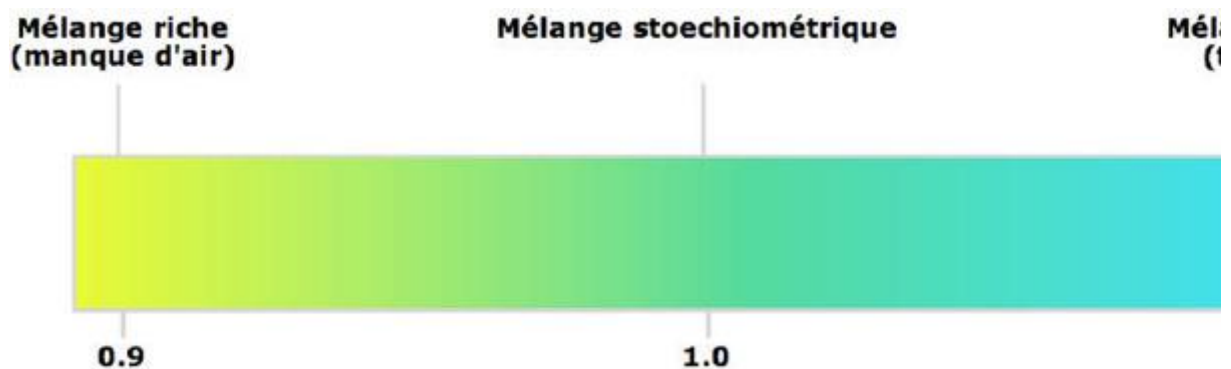
Sonde lambda

Un moteur à essence a besoin pour fonctionner d'un rapport air/carburant bien défini. La combustion complète théorique idéale a lieu pour un rapport de masses de 14,7 : 1. Ce rapport est également appelé « rapport stœchiométrique ». En d'autres termes, il faut une masse de 14,7 kg d'air pour brûler une masse de 1 kg de carburant. Exprimée en volume, la combustion complète de 1 l de carburant nécessite environ 9500 l d'air.



Le coefficient d'air λ (lambda) désigne l'écart entre le mélange air-carburant réellement disponible et le rapport de masses théorique nécessaire (14,7 : 1) :

- $\lambda = 1$: la masse d'air admise correspond à la masse d'air théoriquement nécessaire.
- $\lambda < 1$: il y a déficit d'air et donc mélange riche. La puissance maximale est obtenue pour $\lambda = 0,85$ à $0,95$.
- $\lambda > 1$: il y a excès d'air et donc mélange pauvre. Dans cette plage de valeurs du coefficient d'air, la consommation spécifique est plus faible, mais la puissance développée est moins élevée. La valeur maximale possible de λ , appelée « limite d'inexplosibilité », dépend en premier lieu de la conception du moteur et du mode de carburation utilisé. Au-delà de cette limite, le mélange est trop riche en oxygène et n'est plus inflammable. Des « ratés » de combustion se manifestent et le fonctionnement du moteur devient très instable.

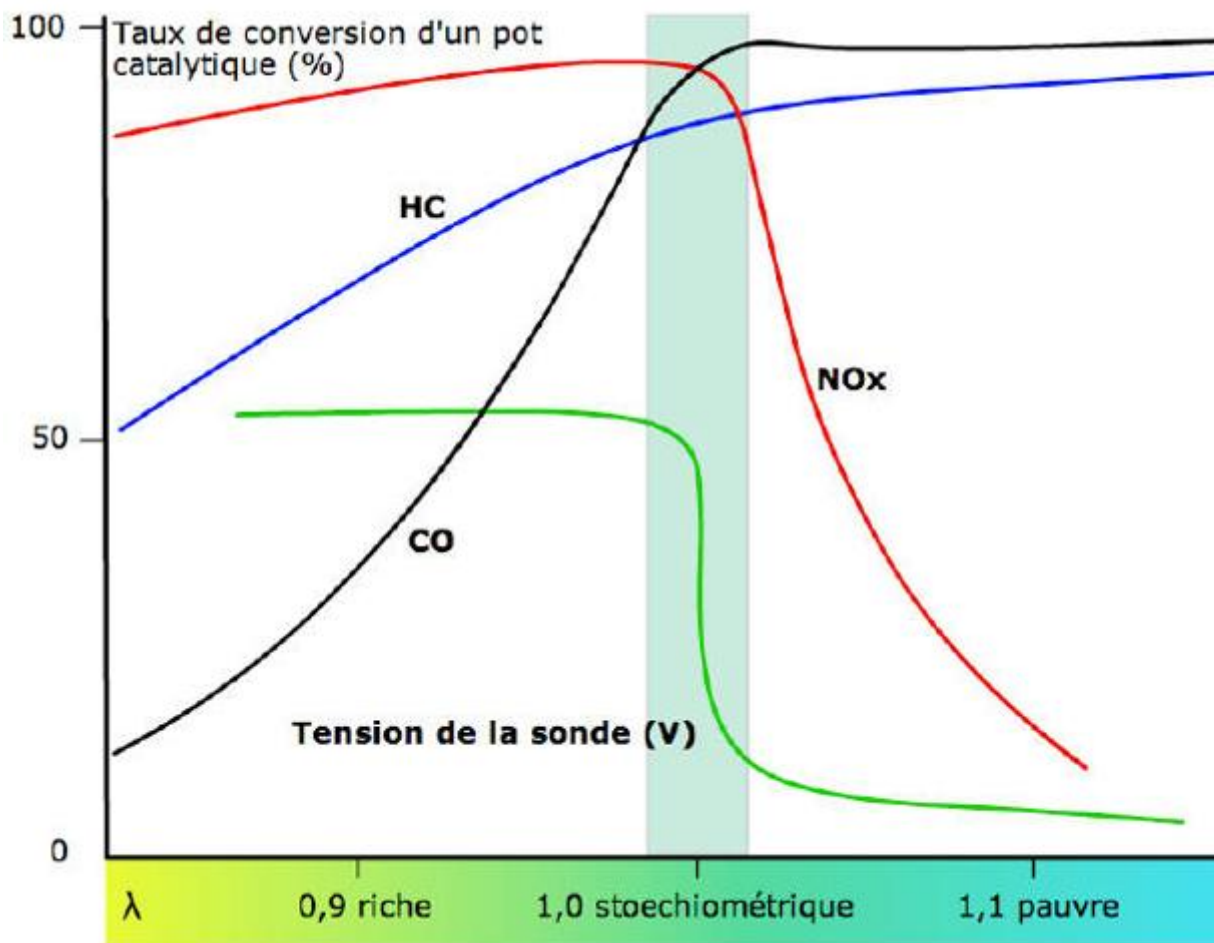


C'est uniquement dans des conditions idéales qu'un pot catalytique peut fonctionner efficacement et donc transformer les trois polluants : hydrocarbures, monoxyde de carbone et oxyde d'azote en gaz moins nocifs, d'où le nom, catalyseur à trois voies.

Aujourd'hui la méthode la plus efficace d'épuration des émissions, suppose que le moteur fonctionne dans une plage très étroite $\lambda = 1 \pm 0,005$ (fenêtre du catalyseur). Une telle précision ne peut être obtenue qu'au moyen d'une régulation exacte du mélange associée à une sonde à oxygène servant de capteur. Une seconde sonde placée en aval du catalyseur permet d'améliorer cette précision.

La sonde lambda assure donc que le dosage du mélange air/carburant soit correct.

Ce rapport garantit des niveaux de pollution bas, le bon fonctionnement du moteur, une consommation de carburant réduite et une durée de vie prolongée du pot catalytique.



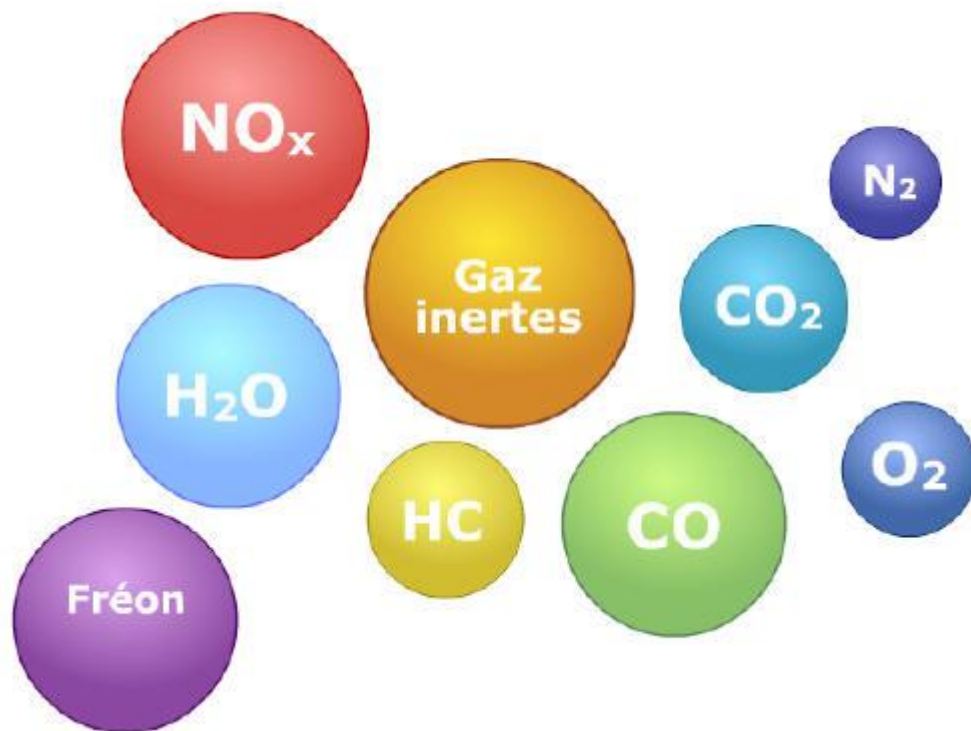
La norme actuelle est Euro 4 ; des normes encore plus intransigeantes sont en préparation. Les gaz d'échappement nocifs ont beaucoup baissé au niveau de la norme Euro 3. Les taux de monoxyde de carbone sont passés de 2,3 à 1,0 (g/km), les émissions d'hydrocarbures ont diminué de 0,20 à 0,10 (g/km) et les taux d'oxyde d'azote ont baissé de 0,15 à 0,08 (g/km).

Le catalyseur à trois voies et la sonde lambda assurent un maintien des taux d'émission dans les limites autorisées.

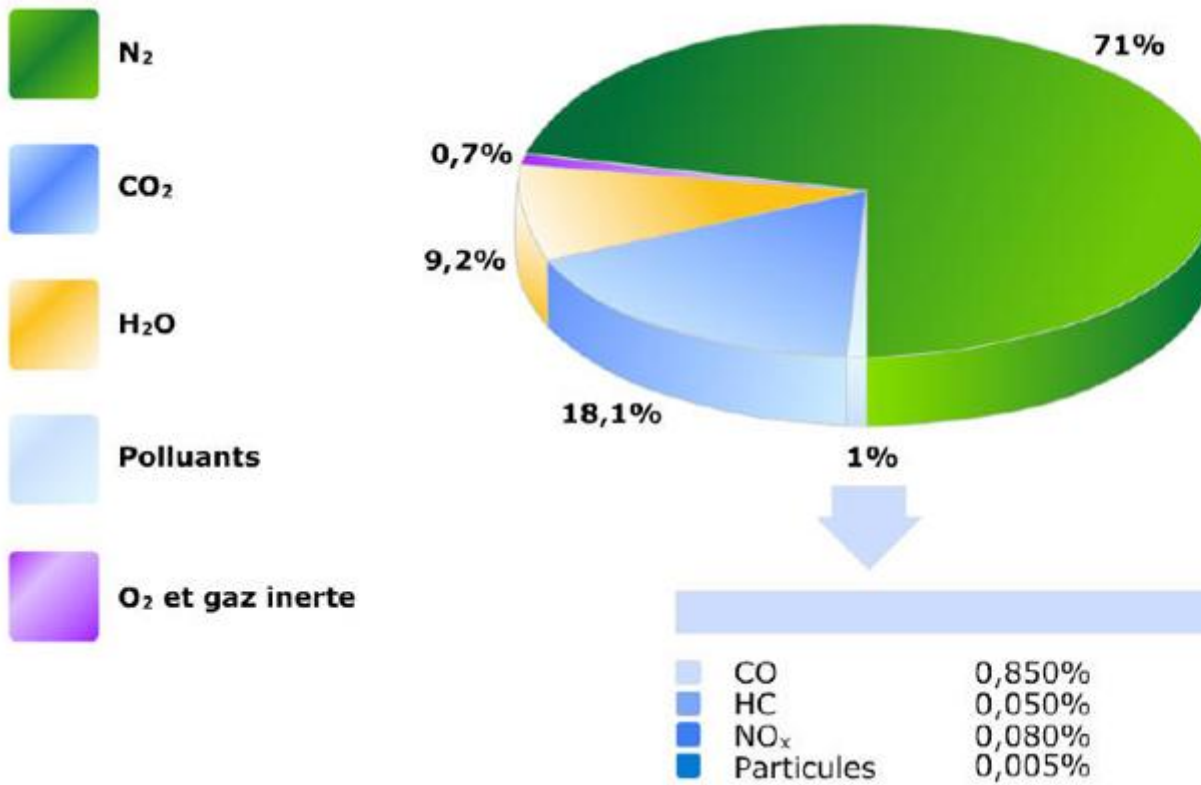
À l'avenir, les motos et les camions, pouvant être particulièrement polluants, seront équipés de sondes lambda. Les moteurs à injection directe de carburant récents sont d'ores et déjà équipés de sondes lambda.

	Entrée en vigueur	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	H (g/km)
Euro I	12 / 1992	2,72	>	>	
Euro II	01 / 1997	2,20	>	>	
Euro III	01 / 2000	2,30	0,20	0,15	
Euro IV	01 / 2005	1,00	0,10	0,08	

Les gaz d'échappement des moteurs ne contiennent pas uniquement des produits inoffensifs comme de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et de l'oxygène, ils contiennent également des polluants dangereux : monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures (HC) et oxyde d'azote (NOx).

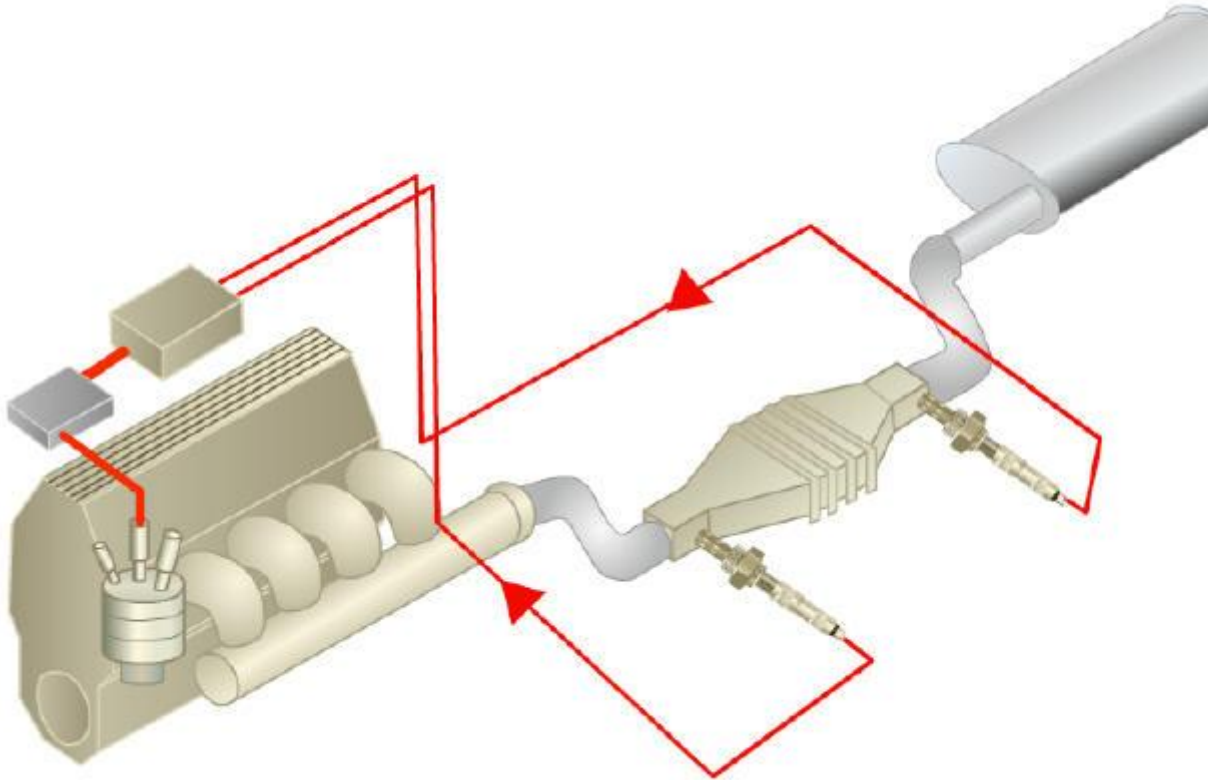


Le volume des émissions dépend du rapport air/carburant. Sans pot catalytique, les gaz toxiques seraient libérés dans l'atmosphère. Le catalyseur se charge de transformer ces gaz nocifs en d'autres gaz moins nocifs comme dioxyde de carbone (CO₂) ; eau (H₂O) ; et azote (N₂).



Voici le schéma de gestion d'un moteur essence ; il comporte :

- Le moteur avec système d'injection
- Un pot catalytique
- 2 sondes lambda
- 1 unité de contrôle



Une sonde lambda est installée sur le système d'échappement, en amont du pot catalytique et sert de sonde de contrôle, une autre sonde lambda est installée après le pot catalytique à des fins de diagnostic.

La tension de la sonde amont transmet un signal d'entrée à l'unité de contrôle, qui régule alors le mélange air/carburant selon les besoins.

Afin de produire le mélange adéquat $\text{Lambda}=1$, le signal du capteur régule le mélange en permanence, plusieurs fois par seconde, en le rendant plus riche ou plus pauvre selon la charge moteur.

Dans les systèmes dotés à la fois d'un catalyseur à trois voies et d'un catalyseur NOX, il y aura trois sondes lambda, une avant et une après le catalyseur à trois voies, et une après le convertisseur NOX. Cette conception est courante sur les moteurs à injection directe.

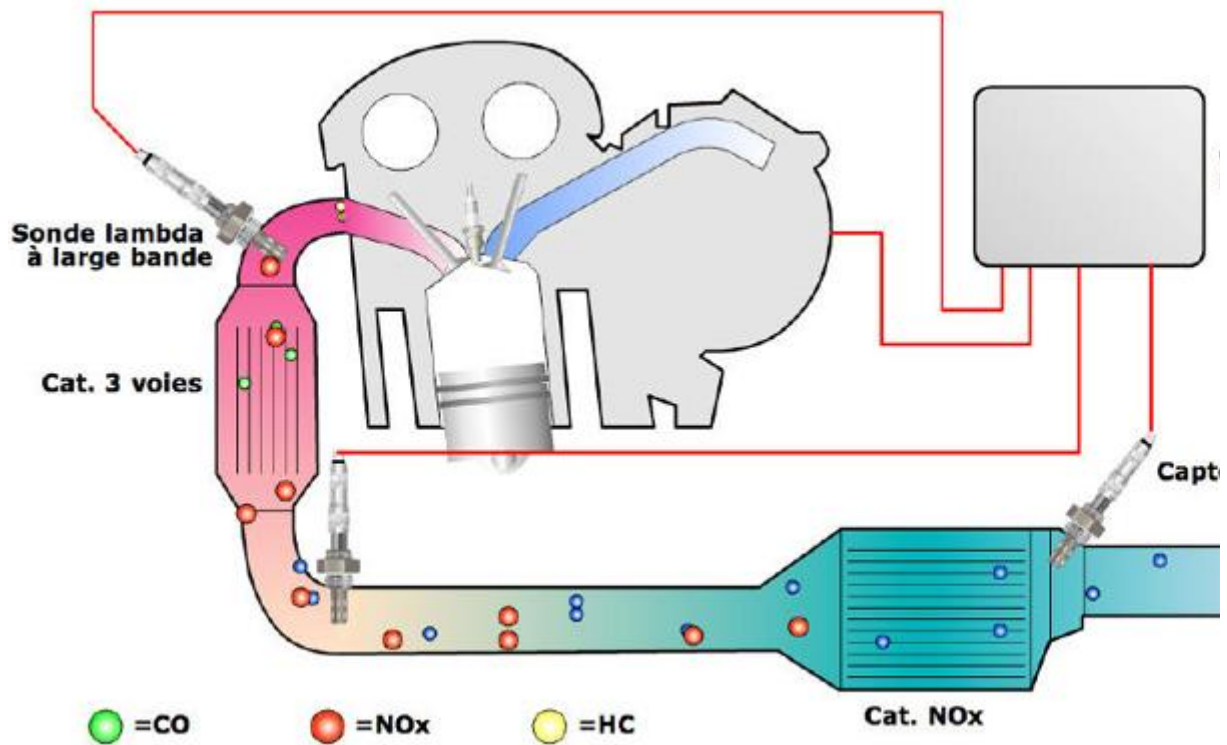


La consommation de carburant et la réduction des niveaux d'émission sont primordiaux et continueront à l'être à l'avenir. La voiture idéale consomme moins de trois litres de carburant pour 100 kms. Pour atteindre cet objectif, les moteurs à essence à injection directe jouent un rôle majeur. Grâce à leur technologie, la consommation de carburant peut être réduite de 12 à 20 %.

Dans les moteurs à mélange pauvre, le point de fonctionnement est très loin de la fenêtre lambda comme nous l'avons vu sur les pages précédentes. Les gaz NOx produits lors de cette combustion ne peuvent pas être convertis efficacement.

C'est pourquoi un catalyseur de stockage des NOx est utilisé. Il stocke temporairement le monoxyde de diazote. Pour une conversion optimale, un capteur NOx est utilisé.

Il envoie l'ordre de passer à un mélange riche ($\text{Lambda} < 1$) pour convertir les NOx en azote inoffensif.

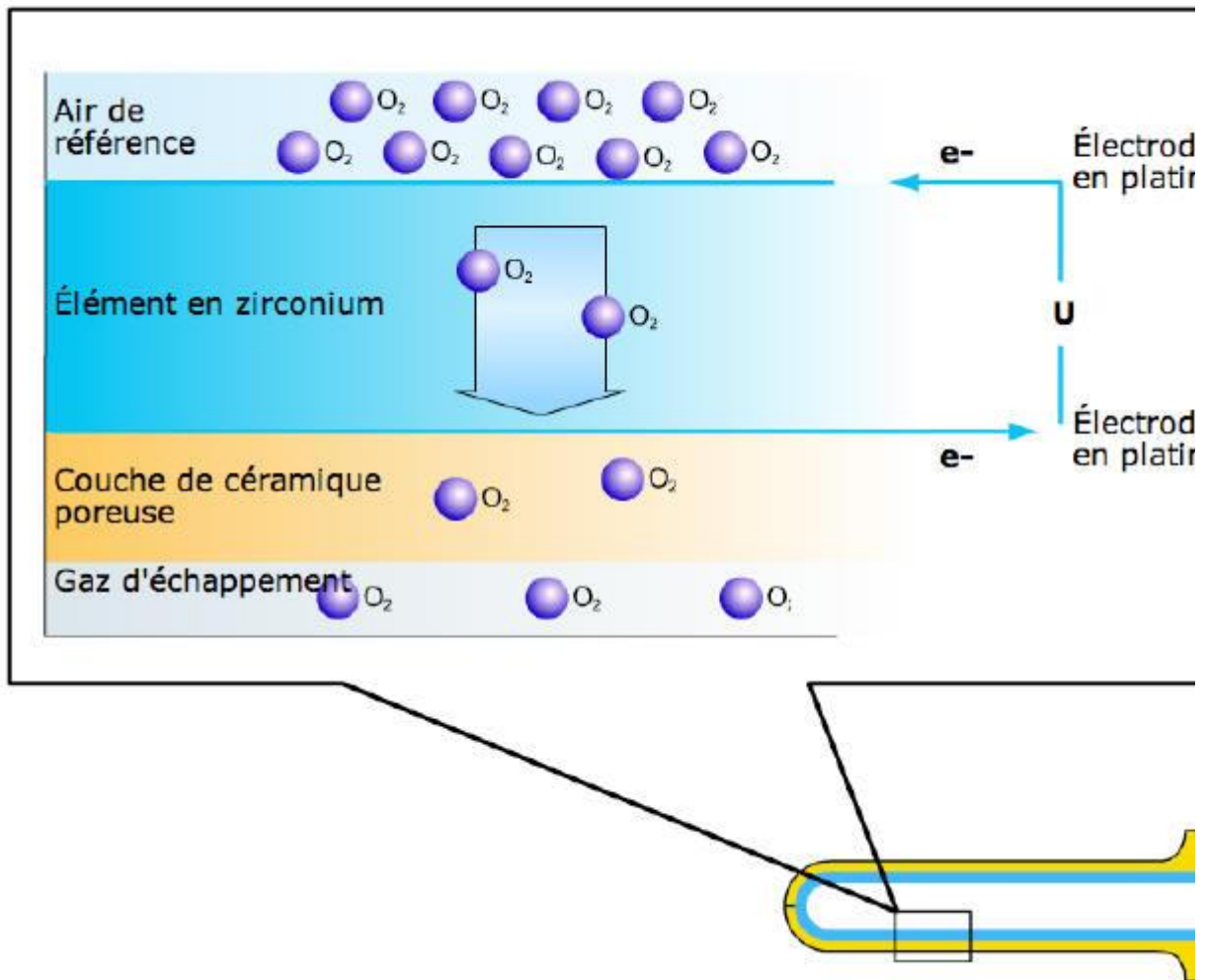


Plusieurs types de sondes lambda sont disponibles. Elles se distinguent par leurs éléments en céramique, où la teneur des gaz d'échappement est mesurée.

- **Sonde lambda au dioxyde de zirconium (ou sonde au zirconium) :**



Elle utilise un élément en céramique creux en forme de doigt. Cet élément est en dioxyde de zirconium. La spécificité de cet électrolyte solide est qu'il devient perméable aux ions d'oxygène lorsque la température atteint environ 300°C.



Les gaz d'échappement passent à l'extérieur de l'élément en forme de doigt. À l'intérieur, on trouve l'air de référence.

Les deux faces de l'élément sont revêtues d'une couche de platine, fine et poreuse, qui fait office d'électrode. Les variations de la concentration en oxygène provoquent un flux d'ions qui entraîne son tour une chute de tension.

- **Sonde lambda au dioxyde de titane (ou sonde au titane) :**



- **Sonde lambda à large bande :**



Instructions de maintenance

La sonde lambda étant sujette à l'usure et au vieillissement, il est recommandé de la vérifier tous les 30 000 kilomètres ou lors de l'inspection annuelle du véhicule.

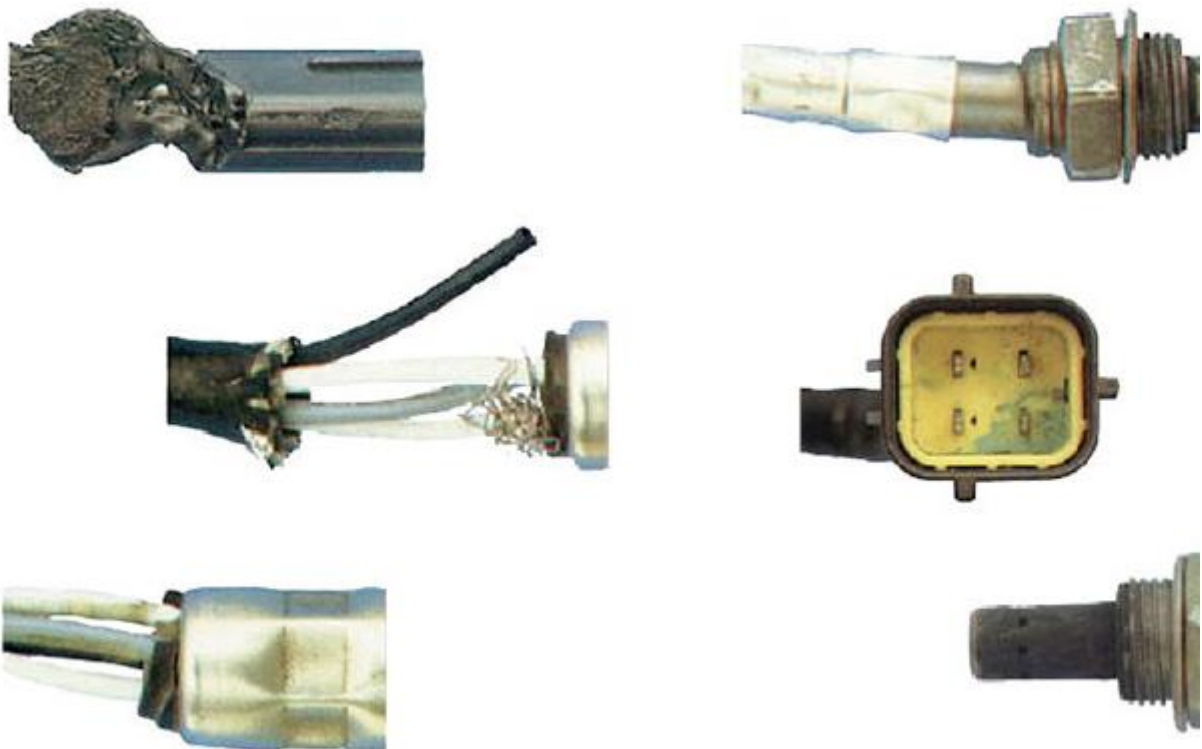
Les conséquences du dysfonctionnement de la sonde sont :

- ralenti irrégulier du moteur
- non-respect des limites établies pour les émissions
- consommation accrue de carburant

Une sonde doit toujours être remplacée par une pièce identique.

Diagnostics à effectuer en atelier

Bien que ce ne soit pas suffisant, un contrôle visuel doit être effectué afin de vérifier les performances de la sonde Lambda. Vérifiez tous les câbles de connexion et les connecteurs, ainsi que le corps de la sonde, afin de détecter les causes éventuelles du mauvais signal obtenu.



Contrôle visuel du tube de protection de la sonde :

L'état du tube de protection de la sonde peut fournir de précieuses informations quant à d'éventuels dysfonctionnements.

Dépôts de plomb :

Les dépôts brillants indiquent que le carburant contient du plomb. Le plomb attaque le métal précieux de la sonde et le pot catalytique. Il faut remplacer la sonde, et s'assurer ensuite de n'utiliser que du carburant sans plomb.



Encrassement dû au carbone :

Des dépôts de suie importants entraînent l'obturation du tube de protection de la sonde et porte donc préjudice au temps de réponse. Ces dépôts peuvent découler d'un mélange de carburant trop riche ou d'un dysfonctionnement de l'élément chauffant de la sonde. Il faut absolument remplacer la sonde.



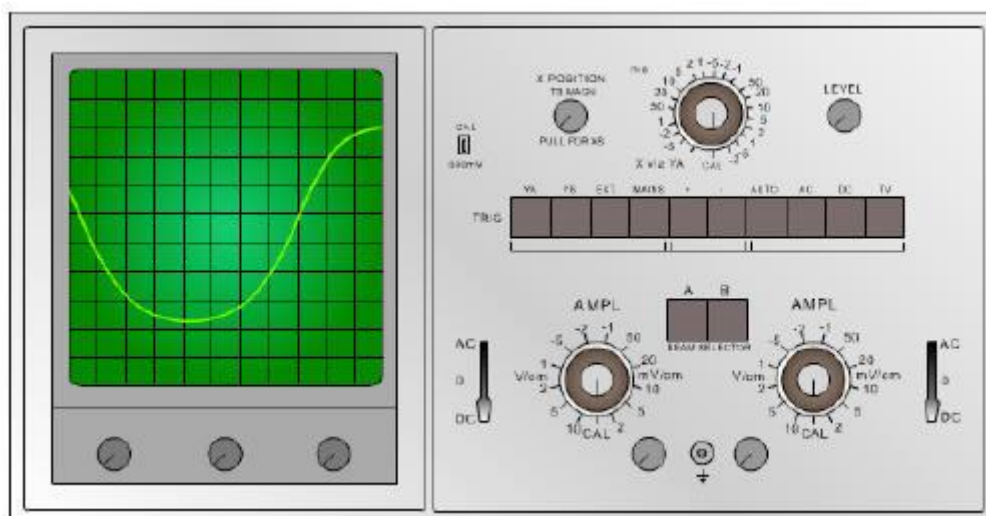
Contamination due à l'huile :

Des dépôts gris ou blancs importants indiquent que le carburant utilisé contient des additifs ou que l'huile du moteur est contaminée.

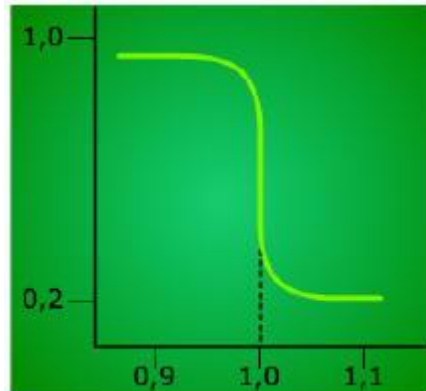


Test fonctionnel à l'aide d'un oscilloscope :

La sonde doit être branchée correctement à l'entrée d'oscilloscope ; la sonde ne doit pas être déconnectée de l'unité de contrôle (la tension de sortie de la sonde est en boucle fermée). Le fonctionnement de la sonde lambda doit être testé lorsque le régime moteur est d'environ 2000 tr/min.



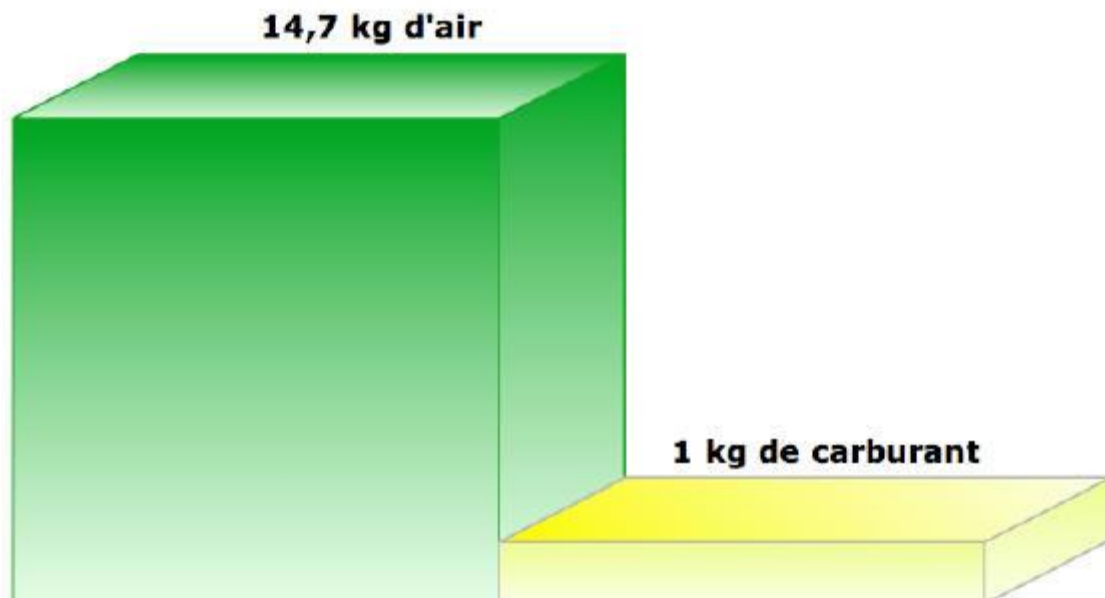
Le signal doit indiquer une tension comprise entre 0,2 volts et 0,8 volts. Le temps nécessaire à une variation de tension, de pauvre à riche et inversement, doit être d'environ 300 millisecondes (env. 3 Hz).



Si le signal de la sonde lambda montre une valeur constante, ou un temps de réaction trop lent, il faut la remplacer.

Sonde lambda

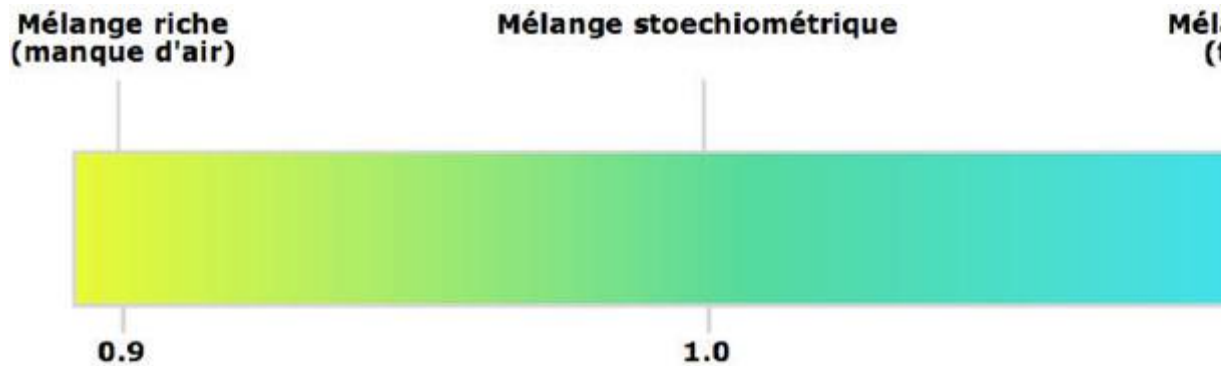
Un moteur à essence a besoin pour fonctionner d'un rapport air/carburant bien défini. La combustion complète théorique idéale a lieu pour un rapport de masses de 14,7 : 1. Ce rapport est également appelé « rapport stœchiométrique ». En d'autres termes, il faut une masse de 14,7 kg d'air pour brûler une masse de 1 kg de carburant. Exprimée en volume, la combustion complète de 1 l de carburant nécessite environ 9500 l d'air.



Le coefficient d'air λ (lambda) désigne l'écart entre le mélange air-carburant réellement disponible et le rapport de masses théorique nécessaire (14,7 : 1) :

- $\lambda = 1$: la masse d'air admise correspond à la masse d'air théoriquement nécessaire.
- $\lambda < 1$: il y a déficit d'air et donc mélange riche. La puissance maximale est obtenue pour $\lambda = 0,85$ à 0,95.
- $\lambda > 1$: il y a excès d'air et donc mélange pauvre. Dans cette plage de valeurs du coefficient d'air, la

consommation spécifique est plus faible, mais la puissance développée est moins élevée. La valeur maximale possible de λ , appelée « limite d'inexplosibilité », dépend en premier lieu de la conception du moteur et du mode de carburation utilisé. Au-delà de cette limite, le mélange est trop riche en oxygène et n'est plus inflammable. Des « ratés » de combustion se manifestent et le fonctionnement du moteur devient très instable.

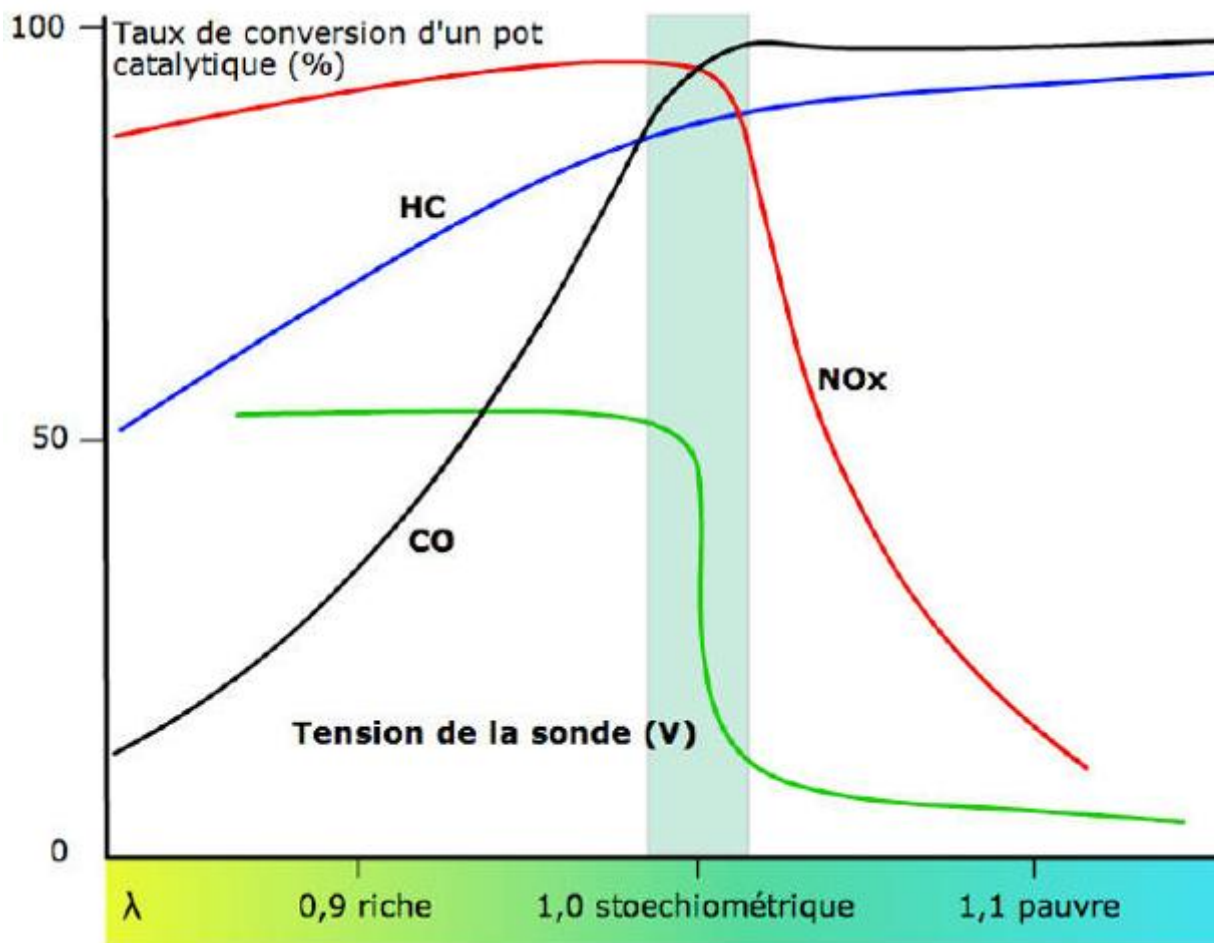


C'est uniquement dans des conditions idéales qu'un pot catalytique peut fonctionner efficacement et donc transformer les trois polluants : hydrocarbures, monoxyde de carbone et oxyde d'azote en gaz moins nocifs, d'où le nom, catalyseur à trois voies.

Aujourd'hui la méthode la plus efficace d'épuration des émissions, suppose que le moteur fonctionne dans une plage très étroite $\lambda = 1 \pm 0,005$ (fenêtre du catalyseur). Une telle précision ne peut être obtenue qu'au moyen d'une régulation exacte du mélange associée à une sonde à oxygène servant de capteur. Une seconde sonde placée en aval du catalyseur permet d'améliorer cette précision.

La sonde lambda assure donc que le dosage du mélange air/carburant soit correct.

Ce rapport garantit des niveaux de pollution bas, le bon fonctionnement du moteur, une consommation de carburant réduite et une durée de vie prolongée du pot catalytique.



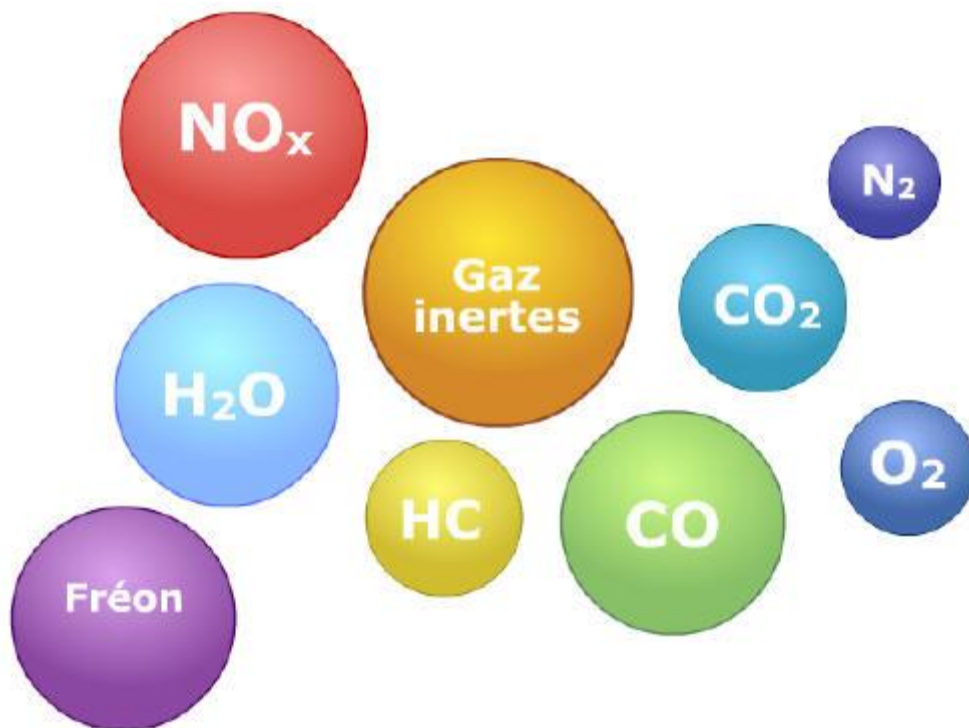
La norme actuelle est Euro 4 ; des normes encore plus intransigeantes sont en préparation. Les gaz d'échappement nocifs ont beaucoup baissé au niveau de la norme Euro 3. Les taux de monoxyde de carbone sont passés de 2,3 à 1,0 (g/km), les émissions d'hydrocarbures ont diminué de 0,20 à 0,10 (g/km) et les taux d'oxyde d'azote ont baissé de 0,15 à 0,08 (g/km).

Le catalyseur à trois voies et la sonde lambda assurent un maintien des taux d'émission dans les limites autorisées.

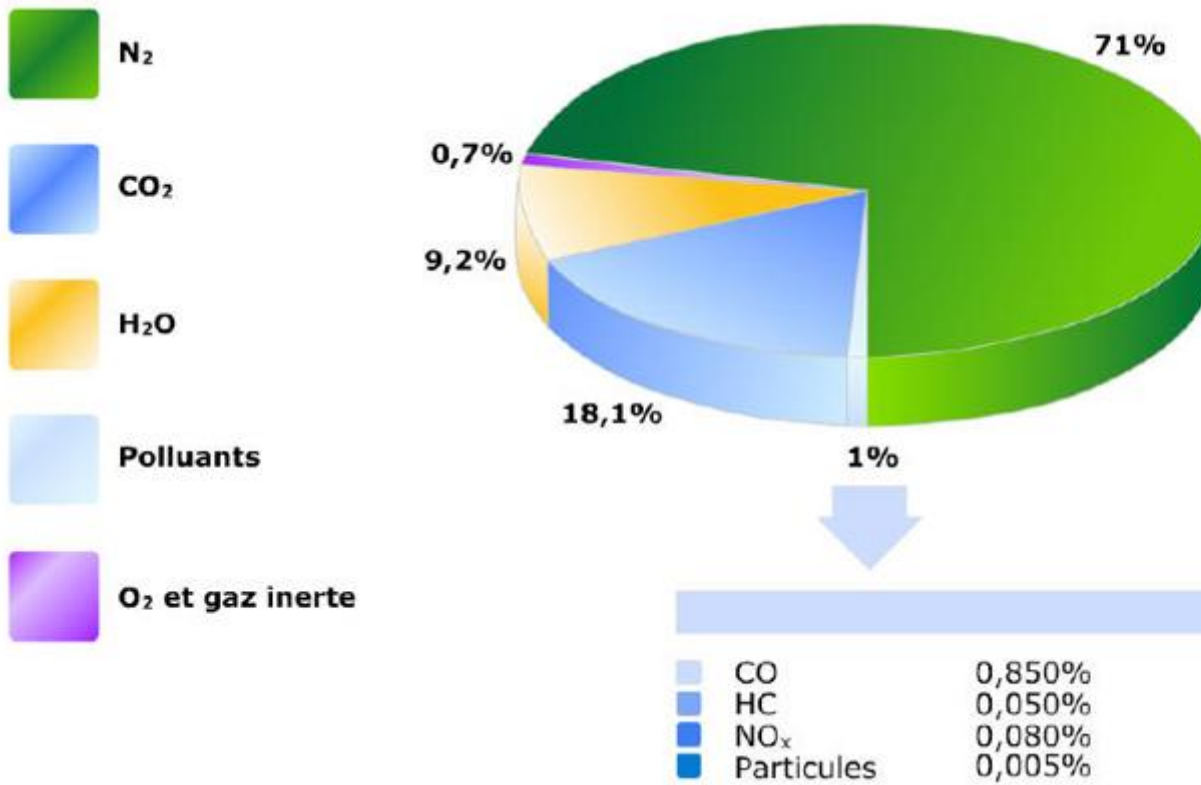
À l'avenir, les motos et les camions, pouvant être particulièrement polluants, seront équipés de sondes lambda. Les moteurs à injection directe de carburant récents sont d'ores et déjà équipés de sondes lambda.

	Entrée en vigueur	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	H (g/km)
Euro I	12 / 1992	2,72	>	>	
Euro II	01 / 1997	2,20	>	>	
Euro III	01 / 2000	2,30	0,20	0,15	
Euro IV	01 / 2005	1,00	0,10	0,08	

Les gaz d'échappement des moteurs ne contiennent pas uniquement des produits inoffensifs comme de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et de l'oxygène, ils contiennent également des polluants dangereux : monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures (HC) et oxyde d'azote (NOx).

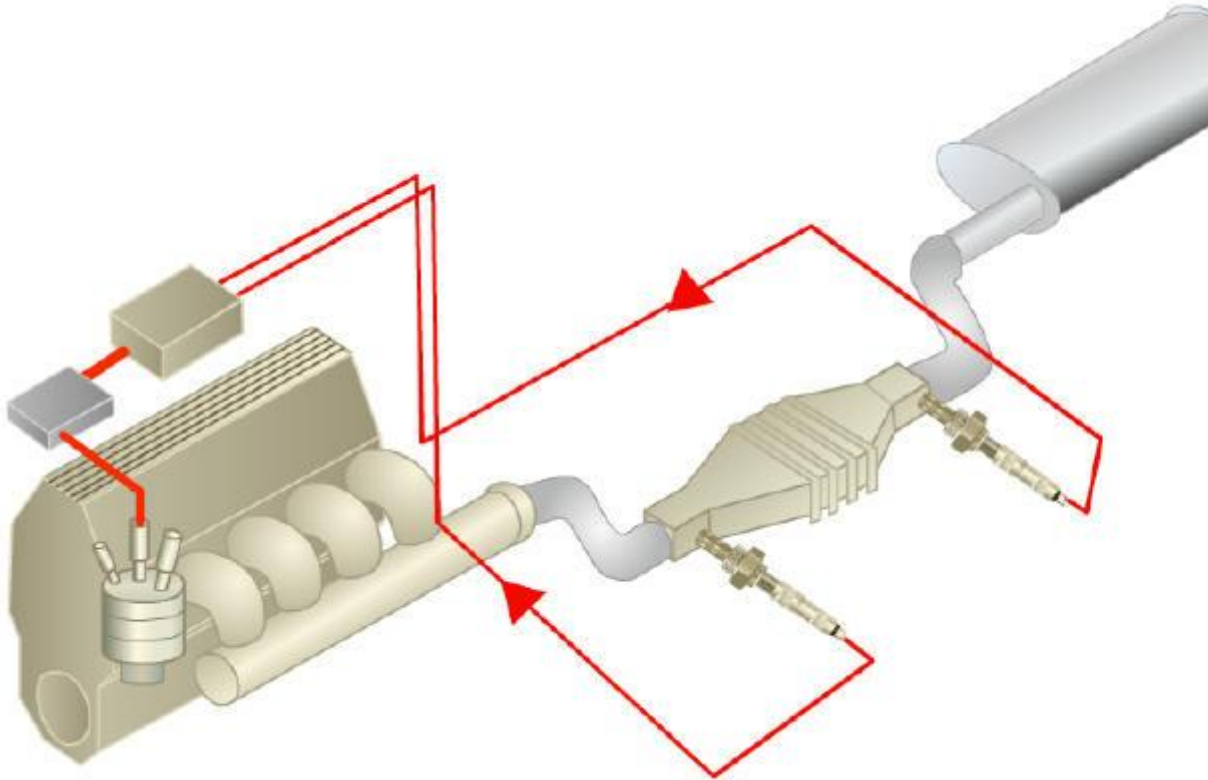


Le volume des émissions dépend du rapport air/carburant. Sans pot catalytique, les gaz toxiques seraient libérés dans l'atmosphère. Le catalyseur se charge de transformer ces gaz nocifs en d'autres gaz moins nocifs comme dioxyde de carbone (CO₂) ; eau (H₂O) ; et azote (N₂).



Voici le schéma de gestion d'un moteur essence ; il comporte :

- Le moteur avec système d'injection
- Un pot catalytique
- 2 sondes lambda
- 1 unité de contrôle



Une sonde lambda est installée sur le système d'échappement, en amont du pot catalytique et sert de sonde de contrôle, une autre sonde lambda est installée après le pot catalytique à des fins de diagnostic.

La tension de la sonde amont transmet un signal d'entrée à l'unité de contrôle, qui régule alors le mélange air/carburant selon les besoins.

Afin de produire le mélange adéquat $\text{Lambda}=1$, le signal du capteur régule le mélange en permanence, plusieurs fois par seconde, en le rendant plus riche ou plus pauvre selon la charge moteur.

Dans les systèmes dotés à la fois d'un catalyseur à trois voies et d'un catalyseur NOX, il y aura trois sondes lambda, une avant et une après le catalyseur à trois voies, et une après le convertisseur NOX. Cette conception est courante sur les moteurs à injection directe.

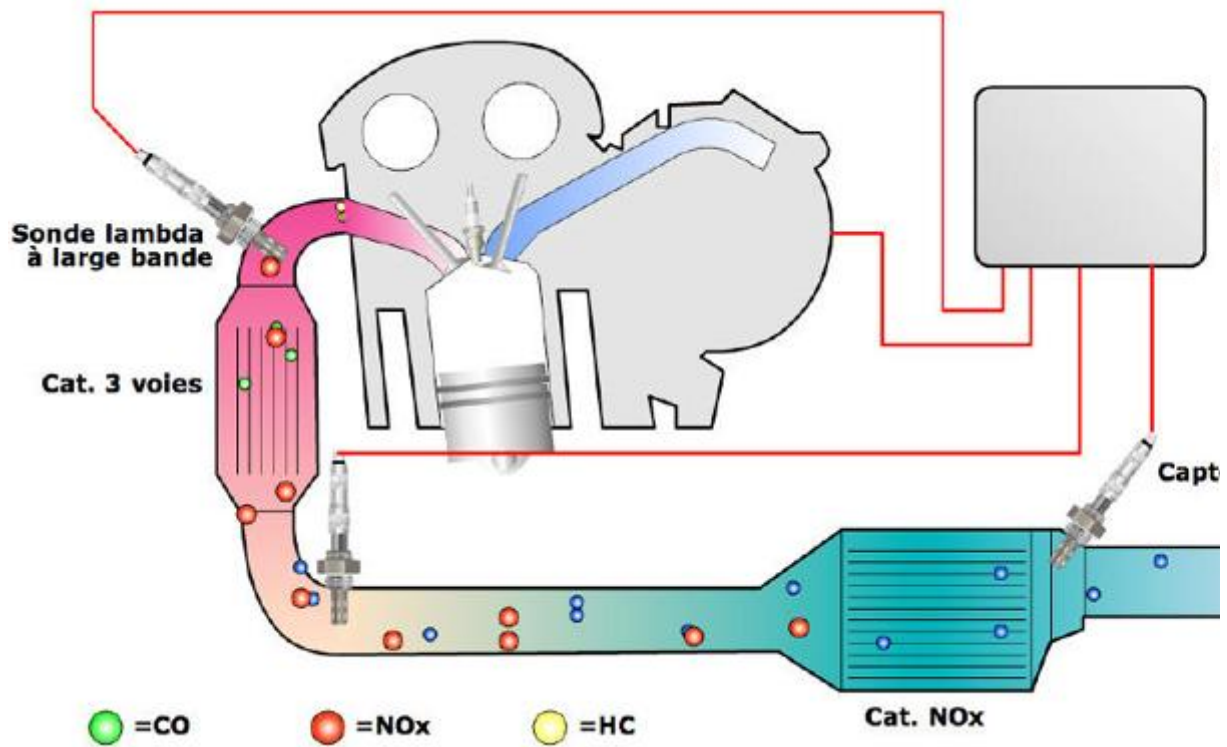


La consommation de carburant et la réduction des niveaux d'émission sont primordiaux et continueront à l'être à l'avenir. La voiture idéale consomme moins de trois litres de carburant pour 100 kms. Pour atteindre cet objectif, les moteurs à essence à injection directe jouent un rôle majeur. Grâce à leur technologie, la consommation de carburant peut être réduite de 12 à 20 %.

Dans les moteurs à mélange pauvre, le point de fonctionnement est très loin de la fenêtre lambda comme nous l'avons vu sur les pages précédentes. Les gaz NOx produits lors de cette combustion ne peuvent pas être convertis efficacement.

C'est pourquoi un catalyseur de stockage des NOx est utilisé. Il stocke temporairement le monoxyde de diazote. Pour une conversion optimale, un capteur NOx est utilisé.

Il envoie l'ordre de passer à un mélange riche ($\text{Lambda} < 1$) pour convertir les NOx en azote inoffensif.

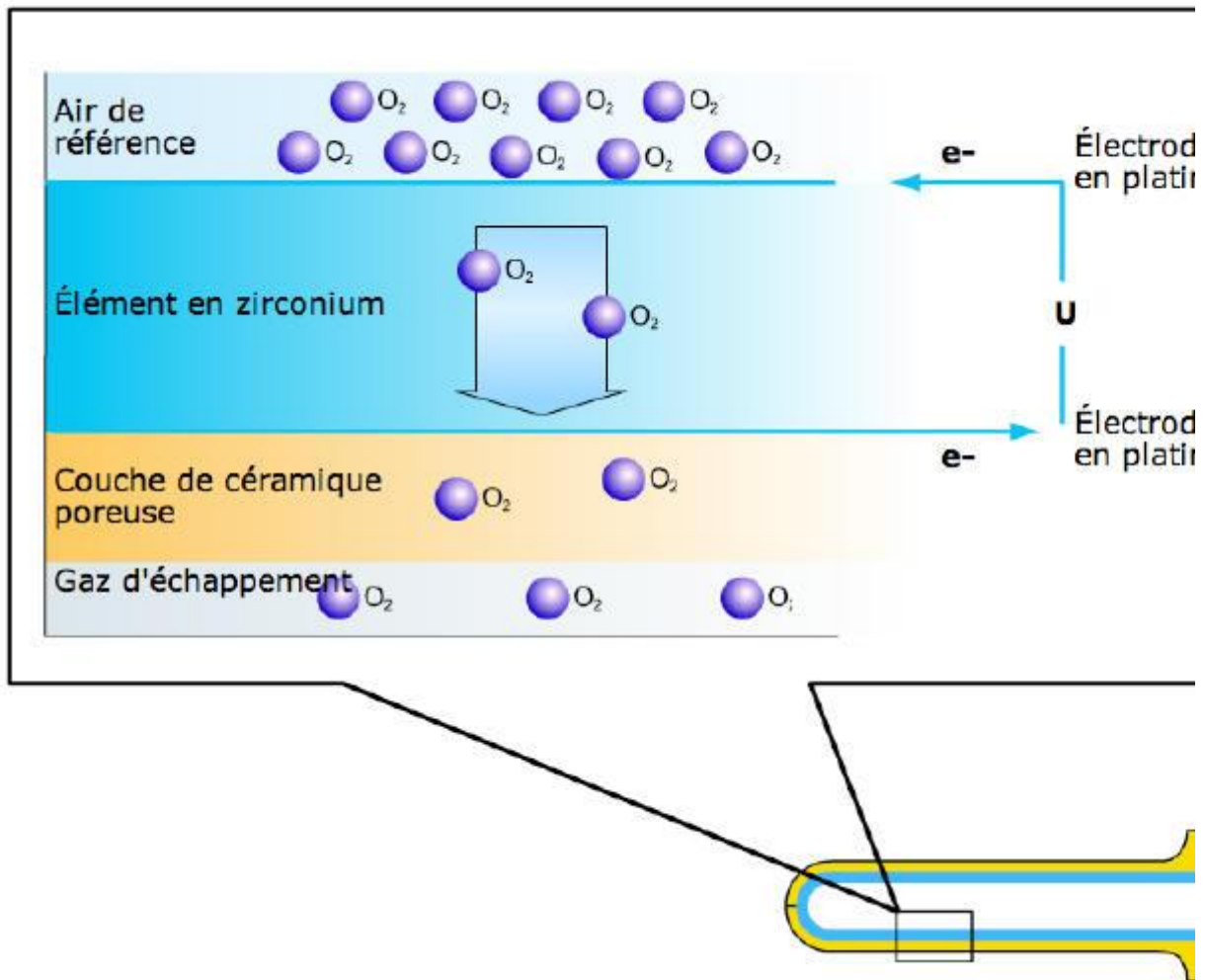


Plusieurs types de sondes lambda sont disponibles. Elles se distinguent par leurs éléments en céramique, où la teneur des gaz d'échappement est mesurée.

- **Sonde lambda au dioxyde de zirconium (ou sonde au zirconium)** :



Elle utilise un élément en céramique creux en forme de doigt. Cet élément est en dioxyde de zirconium. La spécificité de cet électrolyte solide est qu'il devient perméable aux ions d'oxygène lorsque la température atteint environ 300°C.



Les gaz d'échappement passent à l'extérieur de l'élément en forme de doigt. À l'intérieur, on trouve l'air de référence.

Les deux faces de l'élément sont revêtues d'une couche de platine, fine et poreuse, qui fait office d'électrode. Les variations de la concentration en oxygène provoquent un flux d'ions qui entraîne son tour une chute de tension.

- **Sonde lambda au dioxyde de titane (ou sonde au titane) :**



- **Sonde lambda à large bande :**



Instructions de maintenance

La sonde lambda étant sujette à l'usure et au vieillissement, il est recommandé de la vérifier tous les 30 000 kilomètres ou lors de l'inspection annuelle du véhicule.

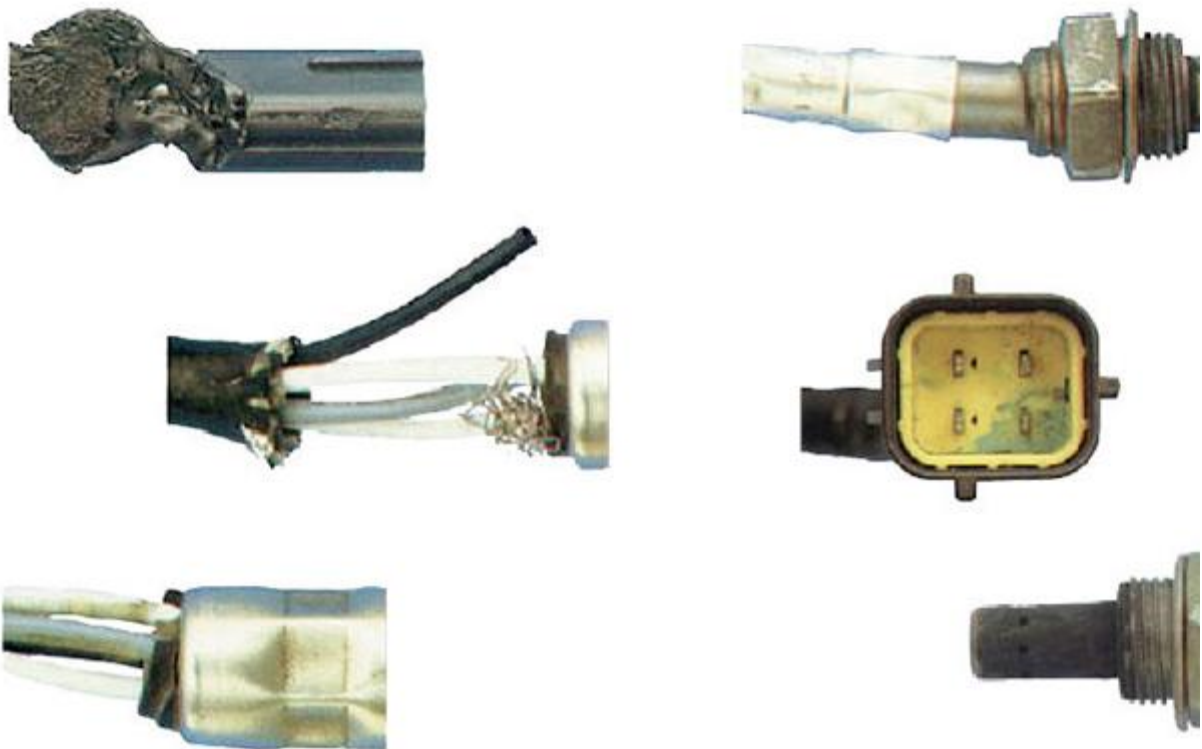
Les conséquences du dysfonctionnement de la sonde sont :

- ralenti irrégulier du moteur
- non-respect des limites établies pour les émissions
- consommation accrue de carburant

Une sonde doit toujours être remplacée par une pièce identique.

Diagnostics à effectuer en atelier

Bien que ce ne soit pas suffisant, un contrôle visuel doit être effectué afin de vérifier les performances de la sonde Lambda. Vérifiez tous les câbles de connexion et les connecteurs, ainsi que le corps de la sonde, afin de détecter les causes éventuelles du mauvais signal obtenu.



Contrôle visuel du tube de protection de la sonde :

L'état du tube de protection de la sonde peut fournir de précieuses informations quant à d'éventuels dysfonctionnements.

Dépôts de plomb :

Les dépôts brillants indiquent que le carburant contient du plomb. Le plomb attaque le métal précieux de la sonde et le pot catalytique. Il faut remplacer la sonde, et s'assurer ensuite de n'utiliser que du carburant sans plomb.



Encrassement dû au carbone :

Des dépôts de suie importants entraînent l'obturation du tube de protection de la sonde et porte donc préjudice au temps de réponse. Ces dépôts peuvent découler d'un mélange de carburant trop riche ou d'un dysfonctionnement de l'élément chauffant de la sonde. Il faut absolument remplacer la sonde.



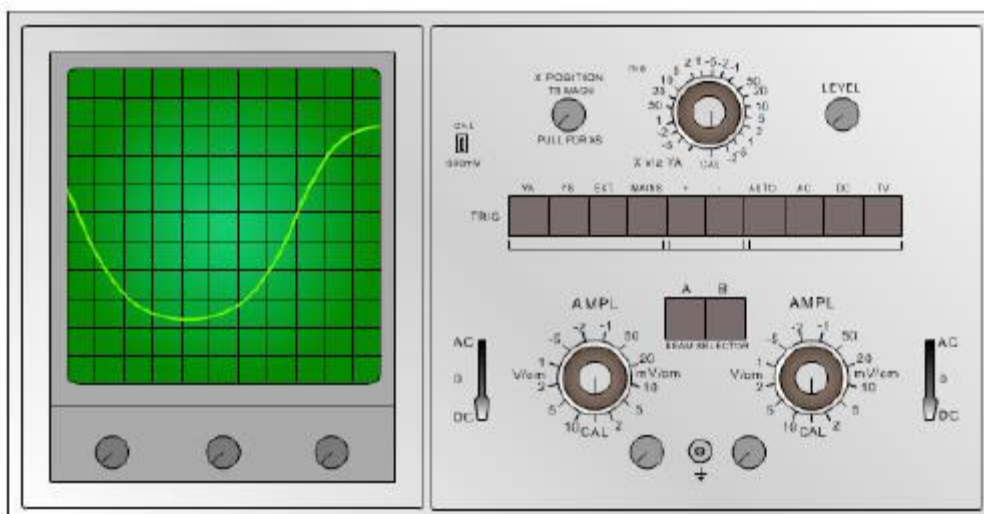
Contamination due à l'huile :

Des dépôts gris ou blancs importants indiquent que le carburant utilisé contient des additifs ou que l'huile du moteur est contaminée.

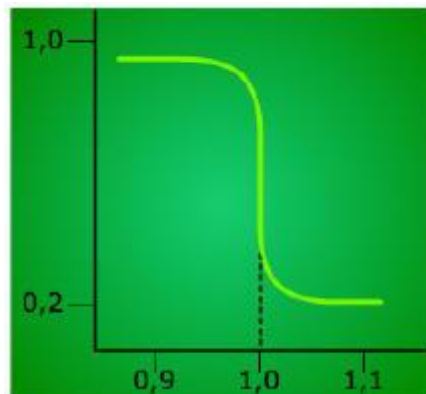


Test fonctionnel à l'aide d'un oscilloscope :

La sonde doit être branchée correctement à l'entrée d'oscilloscope ; la sonde ne doit pas être déconnectée de l'unité de contrôle (la tension de sortie de la sonde est en boucle fermée). Le fonctionnement de la sonde lambda doit être testé lorsque le régime moteur est d'environ 2000 tr/min.



Le signal doit indiquer une tension comprise entre 0,2 volts et 0,8 volts. Le temps nécessaire à une variation de tension, de pauvre à riche et inversement, doit être d'environ 300 millisecondes (env. 3 Hz).



Si le signal de la sonde lambda montre une valeur constante, ou un temps de réaction trop lent, il faut la remplacer.