

CHAPITRE 02

DESCRIPTION DU MOTEUR ET DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1 - LE BANC D'ESSAI ET LE MOTEUR

2 - MESURES DES GRANDEURS MECANIQUES ET THERMIQUES

2.1 - Mesure du couple et de la vitesse moyenne du moteur

2.2 - Mesure du couple et de la vitesse instantanée du moteur

2.3 - Mesure de la vitesse de rotation du turbocompresseur

2.4 - Mesure de la position du cran de combustible

2.5 - Position du point mort haut (PMH)

2.6 - Mesure de la température

2.7 - Mesure de la pression

2.8 - Mesure de la pression dans la chambre de combustion

2.9 - Mesure du débit d'air

2.10 - Mesure du débit de gazole

3 - MESURE DES EMISSIONS DE POLLUANTS DANS LES GAZ D'ECHAPPEMENT

3.1 - Mesure des hydrocarbures imbrûlés totaux HC

3.2 - Mesure des oxydes d'azote NO, NOx

3.3 - Mesure des oxydes de carbone CO, CO2

3.4 - Mesure des fumées

3.5 - Mesure des particules

4 - ANALYSE DYNAMIQUE DES APPAREILS DE MESURE DE POLLUANTS

1 - LE BANC D'ESSAI ET LE MOTEUR :

Nos expériences ont été effectués sur le moteur Diesel 620*45. C'est un moteur à injection directe équipé d'un turbocompresseur à géométrie variable. A cet effet, un banc d'essai a été réalisé. Ce banc d'essai comprend le moteur accouplé à un frein, des chaînes de mesure des paramètres moteur, une chaîne de mesure de polluants et un système d'acquisition rapide des données. L'installation est équipée d'une instrumentation permettant d'assurer : la sécurité de fonctionnement du banc d'essai, les mesures en régimes stationnaires et les mesures en régimes transitoires.

Sur la figure **2.1** est présenté le schéma synoptique du banc d'essais. Les repères des plans de mesures y sont reportés.

Les caractéristiques du moteur sont reportées dans le tableau **2.1**. Les essais sont effectués à une température d'eau de refroidissement réglée à 85° C et une température de gazole réglée à 40° C.

Moteur Diesel 4 temps à injection directe			
6 cylindres en ligne			
Alésage (mm) = 120			
Course (mm) = 145			
Cylindrée (cm ³) = 9839,5			
Rapport volumétrique de compression = 17			
Puissance max. (kW ISO)	=	260	à la vitesse de rotation (tr/min) = 2400
Couple max. (m.daN ISO)	=	158	à la vitesse de rotation (tr/min) = 1200
Pression relative de suralimentation (bar) = 2			
Turbocompresseur	=	SCHWITZER type S2BV / 83.33 BHZM1	
Pompe d'injection	=	BOSCH type P.7100	

Tableau 2.1 : Caractéristiques du moteur utilisé pour les essais.

Le moteur est expérimenté dans une cellule qui assure plusieurs fonctions : La fonction échappement, la fonction ventilation, l'alimentation du banc en eau, l'alimentation du moteur en eau, l'alimentation du moteur en gazole et la fonction sécurité du banc. Le moteur est complètement instrumenté et tous les signaux sont enregistrés sur un calculateur grâce à une carte d'acquisition.

2 - MESURES DES GRANDEURS MECANIQUES ET THERMIQUES :

2.1 - Mesure du couple et de la vitesse moyenne du moteur :

Le couple effectif moyen du moteur est mesuré sur l'arbre, grâce à un frein W450 à courants de Foucault de construction SCHENCK, relié au moteur par un arbre télescopique sur lequel est interposé un couplemètre instantané. Le bras du frein est relié à un peson électrique du type U2A de charge dynamique 1,6t. La vitesse de rotation est obtenue à l'aide d'un capteur photoélectrique.

La figure 2.2 montre schématiquement la composition d'un frein à courants de Foucault : un arbre porte un ou plusieurs disques crénelés, lesquels tournent dans l'entrefer du stator à l'intérieur duquel se trouve des chambres pour la circulation de l'eau de refroidissement ainsi que la bobine d'excitation. Le stator est monté oscillant sur le bâti par l'intermédiaire de roulements ou de ressorts à lames. La réaction au couple du moteur est transmise au bâti par l'intermédiaire du système de mesure du couple.

Le principe de fonctionnement est le suivant : un courant continu parcourt la bobine d'excitation créant ainsi un champ magnétique et, lorsque le disque crénelé est en rotation, il y a création de courants de Foucault générant un couple antagoniste. La régulation du frein est réalisée en agissant sur le courant continu traversant la bobine d'excitation. Le domaine d'utilisation du frein à courants de Foucault est représenté sur la figure 2.3.

Le coffret de commande de l'excitation (série : LSG 2010) permet, grâce à son électronique moderne, de larges possibilités dans la commande du moteur : Commande à régime constant, commande à couple constant et commande par une relation polynomiale : $C_m = a \cdot N^2$.

2.2 - Mesure du couple et de la vitesse instantanée du moteur :

Le couple instantané sur l'arbre du moteur est mesuré grâce à un couplemètre instantané de construction VIBRO-METER, type TG-BPM 1. Ce dernier est relié au moteur d'une part, et au frein à courant de Foucault d'autre part, par des arbres télescopiques munis de deux accouplements. Cet appareil mesure la déformation angulaire due au couple appliqué. Cette déformation se traduit par le déplacement des noyaux de capteurs inductifs, qui en montage différentiel, transforment le déplacement en variation d'amplitude d'un signal modulé. Après une mise en forme électronique interne, l'appareil délivre une tension en volts, proportionnelle aux valeurs de couple. Ce couplemètre réalise en même temps la mesure de la vitesse de rotation instantané à l'aide d'une roue réflective de 60 dents et d'un capteur de proximité qui utilise le

principe de la conversion photoélectrique. Ses principales caractéristiques sont : domaine de fréquence de 0 à 25 KHz, temps de réponse de 300 μ s.

2.3 - Mesure de la vitesse de rotation du turbocompresseur :

Nous avons utilisé une chaîne de mesure composée d'un capteur de proximité et d'un conditionneur adapté. Le tout forme un ensemble calibré. La technique de cette mesure fait appel à un capteur inductif à courants de Foucault. Le détecteur de proximité est ici constitué par une bobine qui représente l'élément sensible d'un oscillateur réalisé à l'aide d'un circuit auxiliaire (figure 2.4). Au voisinage du capteur, la cible conductrice (pôle du rotor du turbocompresseur) est le siège de courant de Foucault qui tendent à réduire l'inductance de la bobine et à augmenter les pertes. L'approche de la cible se traduit par un accroissement de l'amortissement et de la fréquence d'oscillation, avec arrêt de l'oscillation lorsque la distance entre le capteur et la pôle est inférieur à un certain limite. Le signal de sortie est ensuite transformé à l'aide d'un convertisseur fréquence-tension. Le temps de réponse du capteur est de 10 μ s.

2.4 - Mesure de la position du cran de combustible :

Le débit de gazole du moteur est directement proportionnel à la position du cran de combustible. La position du cran de combustible est mesurée à l'aide d'un transformateur différentiel, particulièrement recommandé pour la mesure sur des courses moyennes (de 1 mm à 5 cm) [19]. Il se compose d'une bobine constitué par un enroulement primaire centrale, de part et d'autre duquel sont disposés deux enroulement secondaires. La position est repérée à l'aide d'un noyau plongeur ferromagnétique, solidaire du cran de combustible, qui se déplace à l'intérieur de la bobine (figure 2.5). L'enroulement primaire est alimenté par une tension alternative, et les deux enroulements secondaires sont montés en opposition, de façon à produire une tension de sortie U_s (figure 2.6). L'ensemble est fixé sur la pompe d'injection. Le calibrage de ce système s'est effectué de manière à respecter la linéarité de la caractéristique tension de sortie en fonction de la position du cran de combustible. (calibrage fourni par RVI).

2.5 - Position du point mort haut (PMH) :

La position du point mort haut (PMH) est fournie par un capteur de proximité. Ce dernier délivre un signal à chaque passage d'une cible représentée par un trou borgne percé sur un disque fixé au volant moteur. Ce signal est dirigé sur un ordinateur et un oscilloscope. Le passage de la cible devant l'élément sensible du capteur doit coïncider avec la position "exacte" du PMH du cylindre considéré. C'est pourquoi le calage du PMH et le réglage de la position de référence du capteur avec le point mort haut (PMH), sont très difficiles. La procédure conditionne la précision

des résultats. Nous avons choisi la méthode de calage qui donne la sensibilité maximale de la côte par rapport à l'angle du vilebrequin à mi-course du piston. Cette méthode statique est affinée par la méthode dynamique.

- **Méthode de calage statique du PMH** : On recherche le PMH du piston, culasse non enlevée en plaçant une tige dans le logement du capteur de pression de manière à ce qu'elle touche la tête du piston quand celui-ci à mi-course au cours de la phase de compression, ce point est alors repéré sur le disque et sur le bloc moteur. Cette opération est renouvelée pour la phase de détente. Le point correspondant au milieu des deux repères précédents sur le disque, fixe la position au PMH.

- **Méthode de calage dynamique du PMH** : Une fois la position approximative du PMH repérée, on fait l'acquisition simulée, d'une part du signal de la pression des gaz du cylindre sans combustion, fournie par un capteur de pression, et d'autre part, du signal de PMH fourni par le capteur de proximité. Ce dernier signal doit coïncider avec le maximum de la courbe de pression. On notera cependant que le basculement du piston, les jeux dans l'embellage et dans les paliers font que la détection du PMH n'est pas aisée. Il faut signaler la torsion du vilebrequin au cours du fonctionnement normal du moteur (en combustion) qui risque de fausser le repérage.

2.6 - Mesure de température :

Les températures sont relevées à l'aide de thermocouples fer/constantan et chromel(90% nickel, 10% chrome)/alumel(94% nickel, 3% manganèse, 1% silicium) de classe respectives J et K. Un thermocouple est un circuit électrique constitué par deux conducteurs de nature différentes qui sont reliés entre eux par deux soudures. Lorsque les deux soudures sont à des températures différentes, le thermocouple est le siège d'une force électromotrice, qui est fonction de la nature des deux conducteurs et de la différence de la température entre les deux soudures. Le principe de mesure consiste à maintenir une des jonctions, par exemple T_f , à une température constante connue, et à utiliser l'autre jonction, ici T_c , comme sonde de température. La tension délivrée par le thermocouple donne une valeur qui est fonction de la température (figure 2.7). Les deux connexions de la jonction de référence sont logés dans un bloc isotherme qui les maintient à la même température, la jonction chaude est disposée dans une première gaine isolante, et l'ensemble est logé dans une gaine de protection en forme de canne.

2.7 - Mesure de pression :

Les mesures de pression sont effectuées à l'aide de transmetteurs de pression à couches minces (capteurs piézorésistifs). La pression du milieu à mesurer agit sur la membrane de

séparation du capteur. Cette membrane amène la pression par l'intermédiaire d'un liquide à une pastille en Silicium avec pont de mesure à résistance. Ce pont fonctionne suivant le principe piézorésistif qui exploite la variation de la résistivité du pastille de Silicium en fonction des contraintes : L'apparition d'une force F normale à la plaquette, sur laquelle sont déposées deux électrodes, provoque l'apparition d'une charge Q qui lui est proportionnelle. Cette charge est convertie par la suite en une tension. Le temps de réponse du capteur est inférieur à 3 ms. Des manomètres en U ont également été utilisés.

2.8 - Mesure de la pression dans la chambre de combustion :

La mesure de la pression des gaz dans la chambre à combustion revêt un caractère spécifique. L'élément sensible est un quartz piézo-électrique logé dans la culasse du second cylindre en contact avec les gaz de la chambre de combustion. Comme le diaphragme de mesure est soumis à des températures élevées et qu'il ne supporte pas un échauffement excessif, il est refroidi par un circuit d'eau distillée. Sous l'effet des efforts statiques ou dynamiques, le capteur délivre une charge électrique qui est amplifiée avec amplificateur de charge de haute impédance puis transformée en tension continue qui est envoyée sur ordinateur pour l'acquisition et le traitement des données. Cependant, ce capteur délivre un signal qui n'est pas référencé par rapport à la pression atmosphérique. Le signal délivré est purement relatif à une pression de référence. On notera qu'avant chaque série d'essai, l'ensemble capteur-amplificateur de charge est étalonné grâce à une balance manométrique : l'amplificateur de charge est réglé de telle sorte qu'il délivre une tension de 10 V pour une pression de 200 bars. On applique ensuite sur le capteur des pressions croissantes et on vérifie la linéarité de la réponse du capteur.

2.9 - Mesure du débit d'air

Nous utilisons pour la mesure du débit d'air à l'admission un débitmètre à diaphragme placé entre le filtre et le compresseur sur une conduite assez longue afin d'obtenir un écoulement non turbulent. L'étranglement provoque une variation de la vitesse et de la pression du fluide, et la mesure porte sur la différence des pressions p_1 et p_2 au niveau du tuyau et au niveau de l'étranglement (figure 2.8). Le débit est le même dans le tuyau et dans le diaphragme, la masse volumique de l'air à l'admission est considérée constante, ce qui donne la relation

$$\dot{m}_a = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

où A_1 , v_1 et A_2 , v_2 sont respectivement les sections et les vitesses au niveau du tuyau et du diaphragme. En utilisant la forme classique de l'équation de Bernoulli, on peut écrire :

$$\dot{m}_a^2 \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) = \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho_a}$$

et finalement :

$$\dot{m}_a = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho_a}}$$

Pour cette mesure l'emploi d'un anémomètre à hélice avec tête encliquetante du type Mini Air 5 a été également utilisé. Sa tête aérodynamique permet de tolérer une erreur d'alignement jusqu'à approximativement 25 degrés par rapport à la direction du flux. La mesure est faite au milieu du conduit circulaire d'aspiration d'air à une distance suffisamment éloignée de tout changement de section. Ce capteur fournit la mesure instantanée et la mesure moyenne sur un intervalle de temps de 22 secondes. Le système Mini Air 5 permet également de mesurer la température. Ces mesures servent à déterminer le débit d'air aspiré par le moteur.

2.10 - Mesure du débit de gazole

Nous effectuons pour le débit du gazole deux mesures : le débit volumique et le débit massique.

Pour le débit volumique, c'est un compteur à roues qui est utilisé. Il s'agit du "Micro-oval II" modèle LS 4150. La variation du débit traversant ce capteur entraîne la variation de sa vitesse de rotation. Un aimant noyé à l'intérieur d'une des roues, ouvre et ferme à chaque tour un contact magnétique placé à l'extérieur de la chambre contenant les roues. Le signal fourni est un signal carré dont la période T correspond au passage d'un volume de 5 cm³. Ainsi :

$$\dot{m}_f = \frac{5}{T}$$

La mesure de la période T se fait sur oscilloscope.

La mesure de la masse ou le débit massique de carburant est effectuée en mesurant simultanément une masse M_f de carburant, son temps de consommation Δt et le nombre N_t qu'effectue le moteur. La masse de carburant par cycle du moteur s'écrit :

$$m_f = \frac{M_f}{2 \cdot N_t \cdot \Delta t}$$

Le débit massique est donné par :

$$\dot{m}_f = \frac{M_f}{\Delta t}$$

Cette dernière mesure est mise en oeuvre par l'intermédiaire d'un système électronique réalisé dans notre Laboratoire et composé d'une balance dont la précision varie de 0,1 g à 1g sur une échelle de mesure comprise entre 50 g et 500g (la masse M_f choisie est de 250 g), d'un capteur magnétique de repérage du P.M.H par l'intermédiaire duquel on compte le nombre d'impulsions caractérisant le nombre de tours N_t et d'une horloge intégrée pour mesurer le temps Δt (figure 2.9). Un capteur photoélectrique actionne l'électrovalve de remplissage une fois le niveau bas est atteint, un deuxième capteur coupe l'alimentation en gazole lorsque le niveau haut est assuré.

La consommation spécifique est ainsi déduite à partir de sa définition :

$$C_s = \frac{\dot{m}_f [g/h]}{P_e [Kw]} = \frac{3600}{\eta_e \cdot P_{ci}}$$

où C_s : Consommation spécifique en (g/kwh)

\dot{m}_c : Débit massique de carburant

P_e : Puissance effective recueilli sur le vilebrequin : $P_e = C_m \cdot N$.

La précision de mesure sur la consommation spécifique est donc fonction des incertitudes relatives du couple moteur, de sa vitesse de rotation et du débit massique de carburant consommé :

$$\frac{\Delta(C_s)}{C_s} = \frac{\Delta(N)}{N} + \frac{\Delta(C_m)}{C_m} + \frac{\Delta(\dot{m}_f)}{\dot{m}_f}$$

Cette incertitude relative varie bien sûr avec le point de fonctionnement du moteur défini par les coordonnées N et C .

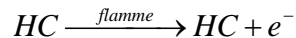
En admettant une évolution linéaire de l'erreur de pesée en fonction de la masse " M_f ", alors pour 250 g correspond une erreur de 0,136 g soit 0,055 %. L'erreur sur la durée de consommation étant négligée, il ressort que la mesure du couple est effectuée à l'aide d'un peson électrique et celle de la vitesse de rotation du moteur à l'aide d'un capteur de proximité (capteur photoélectrique). Lors de notre campagne de mesure, les erreurs relatives maximales observées sont de 0,02 % pour le régime moteur et 0,05 % pour le couple, ainsi l'erreur maximale est de (0,055 + 0,02 + 0,05 = 0,125 %) sur la consommation spécifique.

3 - PRINCIPES DE MESURE DES EMISSIONS DE POLLUANTS DANS LES GAZ D'ECHAPPEMENT :

Afin de pouvoir faire des diagnostics sur la combustion et optimiser les émissions de polluants en vue de passer les normes aux moindres coût, nous avons équipé le banc d'essais technique d'une baie d'analyse COSMA des gaz d'échappement, d'un système AVL pour mesurer les suies et les particules et d'un opacimètre AVL pour mesurer l'opacité des fumées. Le schéma général de mesure est représenté sur la figure 2.10.

3.1 - Mesure des hydrocarbures imbrûlés totaux (HC)

Le principe du dispositif appelé FID (Flamme Ionisation Detector) repose sur la mesure du débit des électrons libérés par l'ionisation des HC :



La figure 2.11 montre le détecteur qui travaille à partir d'une flamme d'hydrogène qui brûle dans l'air et dans laquelle sont injecté les gaz d'échappement du moteur. Deux électrodes de captage sont montés au dessus de la flamme. La proportion en hydrocarbures dans l'échantillon est fonction de l'intensité du courant électrique qui s'établit entre les deux électrodes.

La précision de mesure dépend du rendement de captage des électrons libérés. Le signal de sortie du FID présente une allure parabolique en fonction du débit d'hydrogène H₂ qui alimente la flamme (figure 2.11), la recherche du point maximum est ainsi indispensable à chaque étalonnage de l'appareil. Les gaz d'échappement doivent parvenir au brûleur à une température comprise entre 180° C et 220° C pour éviter la condensation des hydrocarbures. Ce type d'analyseur est compatible avec des mesures en transitoire. L'étalonnage est effectué à l'aide d'un gaz étalon C₃H₈ contenu en bouteille avec une concentration de 350 ppm. L'erreur absolue après étalonnage est de 5 ppm, correspondant à une erreur relative de 1,43 %.

3.2 - Mesure des oxydes d'azote NO, NOx :

La mesure est effectuée par le TOPAZE 820. Le principe de fonctionnement repose sur la "chimiluminescence". Les molécules de NO en présence d'ozone se transforment en NO₂ avec émissions de la lumière selon la réaction :



L'émission se produit lorsque les molécules NO₂ excitées retournent à leur état de base.

Pour mesurer le NO, le gaz à analyser et l'ozone sont aspirés séparément par une pompe jusqu'à la chambre de réaction (figure 2.12). L'énergie lumineuse est capté par un photomultiplicateur à travers un modulateur entraîné par un moteur asynchrone. Le signal recueilli est directement proportionnel à la concentration des NO.

Pour mesurer la concentration des NOx (c'est-à-dire NO + NO₂), l'échantillon est détourné vers un four convertisseur en quartz qui transforme NO₂ en NO. Le signal est alors proportionnel à la concentration de NOx qui rentre dans le convertisseur.

L'étalonnage s'effectue à l'aide d'un gaz de référence contenu en bouteille avec une concentration de 903 ppm pour NOx et de 893 ppm pour NO. L'erreur relative est de 1,1 % correspondant à une erreur absolue après étalonnage de 5 ppm.

3.3 - Mesure des oxydes de carbone CO, CO₂

L'analyseur "DIAMANT 6000 est utilisé pour le dosage des gaz CO et CO₂. Il permet de déterminer le coefficient d'absorption du rayonnement infrarouge k à partir de la mesure des radiations restantes caractéristiques d'un faisceau infrarouge d'intensité I_0 , traversant une cellule de longueur L où circule les gaz d'échappement. La loi de Beer-Lambert permet d'écrire :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot L}$$

d'où
$$k = -\frac{1}{L} \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

Avec : I : Intensité du rayonnement infrarouge reçue.

L'analyseur utilise une source d'infrarouge non sélective placée au centre d'un obturateur cylindrique tournant à une fréquence de 10 tours/seconde (figure 2.13). le rayonnement issu de la source est réfléchi alternativement par deux miroirs (M1 et M2) qui renvoient ainsi vers les cellules de mesure et de référence deux faisceaux à 10 Hz. La cellule de référence est remplie de gaz non absorbant (monoatomiques ou diatomiques); la cellule de mesure est traversé par les gaz d'échappement. Les rayonnements restants pénètrent dans un récepteur sélectif, constitué de deux cuves remplies d'un gaz pur (cuve de mesure et cuve de compensation).

L'étalonnage s'effectue à l'aide d'un gaz de référence contenu en bouteilles avec une concentration de 8997 ppm pour CO et de 15 % en volume pour CO₂. Les erreurs absolues lors

de l'étalonnage sont de 50 ppm de CO et de 0,25 % en volume de CO₂ correspondant à des erreurs relatives respectivement de 1 % et de 3,3 %.

3.4 - Mesure des fumées

La mesure des fumées à l'échappement des moteurs Diesel est un élément essentiel de la mise au point de ceux-ci. En effet, cette mesure renseigne sur la capacité du moteur de bien utiliser l'air qu'il aspire, notamment à fortes charges. On distingue actuellement :

- Les fumées blanches ou bleues, correspondant à du carburant pas ou peu brûlé par manque de température (moteur froid, taux de compression faible, retard à l'injection),
- Les fumées noires composées d'une plus grande quantité de carbone, formées par craquage des molécules de carburant à haute température en présence d'une quantité insuffisante d'oxygène pour assurer une combustion complète.

Les méthodes d'estimation des quantités de particules présentes dans le flux gazeux reposent sur les propriétés optiques de celles-ci et se divisent en deux groupes : Les densimètres dont le principe est basé sur le passage d'un volume donné de gaz d'échappement au travers d'un filtre dont on mesure ensuite le degré de noircissement, et les opacimètres dont le principe est basé sur l'absorption de la lumière au travers des gaz d'échappement (Loi de Beer-Lambert).

Deux appareils ont été utilisés pour assurer cette mesure :

- le premier est un densimètre Bosch formé d'une petite pompe manuelle à piston dont l'actionnement permet d'aspirer un volume des gaz d'échappement à travers un filtre, ce qui donne une fumée selon l'indice Bosch gradué de 0 (filtre blanc) à 10 (filtre noir). Le densimètre Bosch s'utilise en fonctionnement stabilisé du moteur, il est sensible seulement aux fumées noires.
- Le deuxième est l'opacimètre AVL 438 représenté sur la figure **2.14**. Les gaz collectés sur l'échappement sont conduits dans une chambre de mesure, puis ils sont amenés à une pression très proche de la pression atmosphérique et une température de 100 °C. La mesure se fait par un dispositif photoélectrique après une répartition homogène des fumées. L'indice de l'opacité est gradué de 0 à 100 et son lecture se fait sur un affichage numérique. Cette opacimètre est utilisable pour des mesures transitoires, il est sensible aux fumées noires et blanches.

3.5 - Mesure des particules

La notion de particules solides ne correspond pas à des espèces chimiques définies, mais à tout ce qui est captable par un filtre dans des gaz refroidis par dilution. Nous retrouvons les particules donc dans les suies C , les hydrocarbures lourds condensés SOF et les résidus des minéraux présents dans l'huile et le combustible. L'appareil utilisé pour mesurer les particules ne tient pas compte de ces derniers composants.

Nous avons utilisé l'analyseur dynamique des particules développé pour la recherche par la société AVL. Cet appareil déduit, selon un modèle incorporé, le taux de particules à partir de la mesure des suies graphitiques et des hydrocarbures totaux. Le principe de mesure repose sur l'absorption par des structures moléculaires différentes, "C" et "HC", des rayons infrarouges à des longueurs spécifiques. Les rayons infrarouges traversent une cellule remplie de gaz d'échappement. L'alternance entre les longueurs d'ondes différentes est réalisée à l'aide d'un disque tournant sur lequel sont montés des filtres. La réduction d'intensité de chaque longueur d'onde est comparée à une mesure de référence faite simultanément sur l'air pur de combustion aspiré par le moteur. Les concentrations des particules PM sont donc calculées à partir de ces données d'extinction selon l'expression :

$$PM = C + SOF$$

PM : Particules en (mg/m^3),

SOF : Fraction organique soluble des HC en (mg/m^3).

Dans l'expression de PM , les SOF sont approximés par le modèle corrélatif :

$$SOF = HC_{cond}(T) = HC_{tot} \cdot F(T)$$

$$F(T) = A(T) + B(T) \cdot \ln(HC_{tot})$$

avec $A(T)$ et $B(T)$ polynômes fonctions de la température.

Comme la mesure s'effectue en gaz brut, l'usage est de considérer $T = 70^\circ \text{C}$, donc $HC_{cond}(70)$. Ce modèle reste valable pour une fourchette de température comprise entre 20 et 100°C . Cependant pour quelques moteurs, l'évaluation de $HC_{cond}(70)$ pose quelques problèmes. Alors deux autres modèles sont proposés :

Modèle 1 :

$$SOF - 1 = \underbrace{HC_{tot} (0,0795 + 0,0568 \cdot \ln(HC_{tot}))}_{HC_{cond}(70)} \cdot 1,8^{Ln(C)}$$

Modèle 2 :

$$SOF - 2 = HC_{tot} \cdot \left[0,22 + \left(\frac{30 \cdot fc}{HC_{tot} + Xc} \right) \right]$$

avec :

$$Xc = 10 + C/4 \quad \text{pour } C < 60 \text{ mg/m}^3$$

$$Xc = 25 \quad \text{pour } C > 60 \text{ mg/m}^3$$

$$fc = 1.7 + (0.3C/20) \quad \text{pour } C < 20 \text{ mg/m}^3$$

$$fc = 2 + (C-20)/30 \quad \text{pour } 20 < C < 80 \text{ mg/m}^3$$

$$fc = 4 \quad \text{pour } C > 80 \text{ mg/m}^3$$

Les principales caractéristiques de cet analyseur sont sa bonne reproductibilité : + 2 % de la valeur mesurée, sa gamme de mesure pour "C" et "HC" : de 0...2000 mg/m³ et sa vitesse d'acquisition : 20 mesures par seconde.

4 - ANALYSE DYNAMIQUE DES APPAREILS DE MESURE DE POLLUANTS :

Notre objectif étant d'effectuer des mesures en régime transitoire, il est donc nécessaire de s'assurer de l'adaptation des appareils disponibles, à la dynamique des phénomènes étudiés. Il est montré dans [38] que le temps de réponse d'un appareil de mesure T_{ap} doit être de l'ordre de 10 fois plus petit que celui du phénomène étudié T_{ph} .

$$T_{ap} \leq (10 \text{ à } 15) T_{ph}$$

Les caractéristiques dynamiques des chaînes de mesure ont été analysées sur la base de leur réponse indicielle. Leur temps de réponse se compose d'une part du temps de transport de l'échantillon des gaz d'échappement depuis la sonde de prélèvement jusqu'à l'analyseur et d'autre part du temps de réponse propre de l'appareil. Ce dernier peut être, selon l'analyseur considéré, constitué de plusieurs temps partiels (retards purs et constantes de temps). Pour un polluant "p", le temps de réponse total de la chaîne s'écrit donc :

$$T_{ch p} = T_{ret} + T_{ret GF} + T_{ret conv} + T_{ap p}$$

T_{ret} , $T_{ret GF}$ et $T_{ret conv}$ sont des retards purs constants quelque soit le régime étudié (stationnaire ou transitoire), du fait que le prélèvement de l'échantillon des gaz d'échappement s'effectue à pression constante.

La figure **2.15** montre l'exemple de l'enregistrement du signal de sortie de l'analyseur des oxydes d'azote pour une entrée indicielle à pleine échelle. L'évaluation du temps de transport de l'échantillon des gaz d'échappement depuis la sonde de prélèvement jusqu'à l'entrée de l'analyseur, (figure **2.10**), est basée sur la connaissance du débit volumique de la pompe de circulation des gaz (13,5 l/mn) et des dimensions de la ligne de transport (longueur totale des lignes chauffées = 18,3 m, et de diamètre intérieur moyen du cordon = 4 mm) en supposant que le gaz est incompressible. Le retard pur T_{ret} est ainsi évalué à 1,8 s. Le temps de séjour dans le groupe froid $T_{ret GF}$ est égal à 4,7 s. Il faut encore ajouter une constante de temps supplémentaire $T_{p NOx}$ de 7,5 s due à la dynamique propre de l'analyseur, soit un temps de réponse total (à 63%) de la chaîne de mesure $T_{ch NOx}$ de = 18 s.

A titre d'exemple quelques constantes de temps à 63%, relatives à la production des NOx pour des excitations en échelon de la position du levier de commande "La" et pour différentes valeurs du couple résistant " C_m " sont rassemblées dans le tableau **2.2**.

Tenant compte de ces constantes de temps, nous constatons que le critère sur T_{ap} est loin d'être respecté et cela dans tout le domaine de fonctionnement du moteur, d'où l'impossibilité d'obtenir des mesures de NOx en régime dynamique à l'aide de cet appareil. En procédant d'une façon similaire pour NO, CO et CO₂ nous aboutissons à la même conclusion de temps élevées de l'ordre de 6 à 7,5 s des analyseurs NO, NOx, CO et CO₂ sont donc incompatibles avec le niveau de la dynamique étudiée.

C_m [N.m]	Variation de La [%]	Variation de NOx [ppm]	Constante de temps $T_{ph NOx}$ [s]
0	30-45	76-161	7,8
35	36-55	136-264	8,6
70	45-55	205-272	8,5
105	55-65	258-322	7,8

Tableau 2.2 : Essais tests des NOx

Par contre les essais avec l'analyseur des HC a été concluant. La figure **2.16** montre l'enregistrement du signal de sortie de cet analyseur à partir d'une entrée indicielle correspondant à la pleine échelle. Le retard pur $T_{ret HC}$ égal à 1,2 s apparaissant sur cette figure est dû au transport du gaz à travers la ligne reliant la bouteille d'étalonnage à l'analyseur. Le tableau **2.3** résume les résultats relatifs aux constantes de temps et retards purs des différents analyseurs.

Analyseur	Constante de temps T_{ap} [s]	Groupe froid $T_{ret GF}$ [s]	Convertisseur NOx NO $T_{ret conv}$ [s]	Retard pur total T_{ret} [s]
HC	0,45	0	0	0
NO	7,5	4,7	0	4,7
NOx	7,5	4,7	4	8,7
CO	6,5	4,7	0	4,7
CO2	6	4,7	0	4,7
Opf	< 0,05	0	0	0

Tableau 2.3 : Constantes de temps et retards purs des appareils de mesure des polluants

Figure 2.1 : Schéma synoptique du banc d'essai

Figure 2.2 : Coupe frontale d'un frein à courant de Foucault

Figure 2.3 : Domaine d'utilisation d'un frein à courant de Foucault

Figure 2.4 : Circuit d'un capteur de proximité

Figure 2.5 : Dispositif de mesure du cran de combustible

Figure 2.6 : Circuit électrique du dispositif différentiel

Figure 2.7 : Principe de mesure de la température

Figure 2.8 : diaphragme de mesure du débit

Figure 2.9 : Schéma du principe de mesure du débit de gazole

Figure 2.10 : Banc d'essai moteur

Figure 2.11 : Schéma de principe du FID

Figure 12 : Schéma de principe de fonctionnement de l'analyseur des oxydes d'azote.

Figure 2.13 : Schéma de principe de l'analyseur des gaz CO et CO₂

Figure 2.14 : Principe de mesure de l'Opacité par l'AVL 438

Figure 2.15 : Enregistrement entrée-sortie de l'analyseur des oxydes d'azotes NOx

Figure 2.16 : enregistrement entrée-sortie de l'analyseur des hydrocarbures "HC"