

Méthodologie d'étude de la qualité du bruit de combustion d'un moteur diesel d'automobile à partir de l'analyse de sa pression en cylindre

Cet article vise à proposer une alternative plus efficace à l'analyse traditionnelle du bruit de combustion, à partir de l'étude des spectres classiques de la pression en cylindre et du bruit rayonné. Le recours à des indicateurs caractéristiques des trois principaux phénomènes physiques liés à la combustion, à la compression, à la combustion et à la résonance, s'avère plus adéquat dans le but d'établir une relation fiable entre la pression en cylindre, source de bruit, et la qualité sonore, effet acoustique quantifié par un jury d'experts par le biais d'une note [1].

À plus long terme, ces résultats constitueront un outil utile pour améliorer la qualité sonore et les stratégies d'injection afin, entre autres, de combiner les aspects acoustique, pollution et performances [2].

**F. Payri,
A.J. Torregrosa,
A. Broatch,
V. Marant,**
CMT – Motores Térmicos,
Universidad Politécnica de Valencia,
Camino de Vera s/n,
46022 Valencia (Espagne),
E-mail : cmt@mot.upv.es

I. Beauge,
PSA Peugeot Citroën,
18, rue des Fauvelles,
92250 La Garenne-Colombes (France),
E-mail : beauge@mpsa.com



aujourd'hui, le bruit de combustion joue un rôle très important dans l'étude de la qualité acoustique d'un véhicule [3,4]. En effet, il agit de manière prépondérante sur le bruit intérieur et le bruit extérieur. Il dépend principalement d'une part, de la structure du moteur et des matériaux utilisés et d'autre part, de la combustion elle-même et de la stratégie d'injection [5,6,7].

Cette étude s'oriente exclusivement vers l'analyse des conséquences acoustiques directes de la combustion, c'est-à-dire de la pression en cylindre [8]. Aucun aspect structural n'est donc considéré.

Cette étude se base sur des mesures simultanées de pression en cylindre et de bruit rayonné, acquises grâce à l'équipement binaural de Head Acoustics et dont la qualité sonore est postérieurement estimée par un jury d'experts en acoustique [1]. Une vaste campagne d'essais, comprenant de nombreuses vitesses de rotation, charges et conditions d'injection, a donc été réalisée.

Dans un premier temps, la nécessité de travailler à partir

de paramètres caractéristiques de la combustion, et éventuellement du bruit, est démontrée.

Puis la méthodologie retenue, basée sur la décomposition de la pression en cylindre selon les trois principaux phénomènes physiques présents lors d'un cycle de combustion, est expliquée.

Enfin, les résultats sont présentés sous forme de corrélation entre indicateurs de la combustion et note du jury.

Problématique liée à la subjectivité du bruit de combustion

Avant de développer les étapes principales de l'étude réalisée, il convient de mettre en évidence les non-linéarités des phénomènes présents. Elles justifient en effet l'usage d'indicateurs de la combustion.

La figure 1 représente le processus complet de propagation du son [6,7,9], depuis son origine dans les cylindres, jusqu'à son évaluation subjective par un jury d'experts.

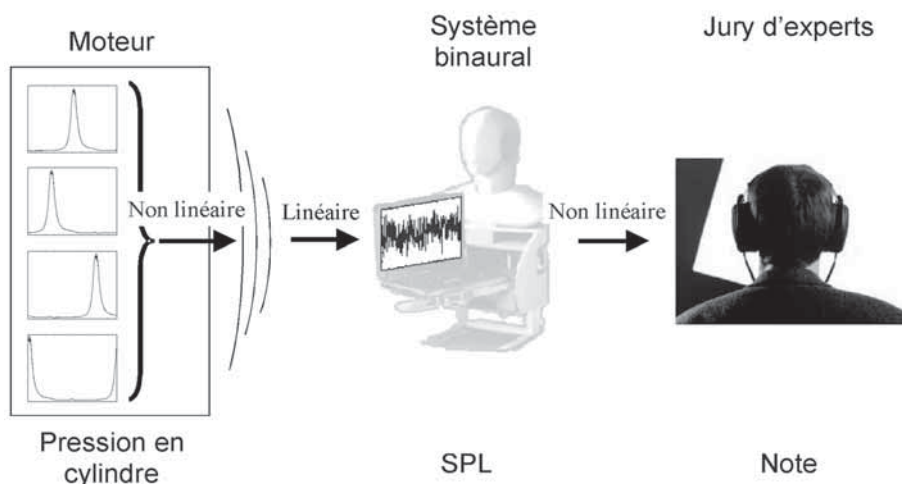


Fig. 1 : Schéma de propagation du son

Les sources fondamentales sont donc les signaux de pression en cylindre.

Ensuite, l'excitation ainsi créée est transmise au bloc moteur de manière non linéaire. En effet, il n'existe que très peu de corrélation entre pression en cylindre et accélération, quel que soit l'emplacement de l'accéléromètre ainsi qu'entre pression en cylindre et bruit rayonné (Sound Pressure Level). En particulier, la répartition énergétique entre les fréquences propres, liées au mouvement du piston, c'est-à-dire à la vitesse de rotation du moteur, est redistribuée de manière désordonnée après passage à travers le bloc.

À l'inverse, la propagation dans l'atmosphère jusqu'aux microphones de mesure de SPL de l'équipement binaural est linéaire.

La figure 2 montre dans le cas d'un essai à 2 000 rpm et 48 % de charge que la sensation de gêne sonore, traduite de manière subjective donc fortement non linéaire par la note, peut être qualitativement décrite par des indicateurs, comme les paramètres psychoacoustiques, alors que l'étude du simple spectre s'avère inutile. Dans cet exemple, les spectres des essais au bruit agréable (couleur claire) et désagréable (couleur sombre) sont très ressemblants et le niveau sonore total est égal alors que leurs différences subjectives sont nettement décelées par au moins un des paramètres psychoacoustiques, ici le Loudness.

Il semble donc plus cohérent d'avoir recours à des indicateurs caractéristiques de la subjectivité de la pression en cylindre et du bruit rayonné (SPL) plutôt que d'essayer de résoudre mathématiquement ces problèmes non linéaires, subjectifs et donc probablement non modélisables.

Méthodologie de calcul d'indicateurs de la combustion

À ce stade, seuls des indicateurs issus des signaux de pression en cylindre et capables de donner une bonne évaluation de la note sont recherchés. L'objectif est d'obtenir un modèle fiable à un point près sur 10.

En premier lieu, les notes, et les essais en général, présentant une trop grande dispersion ont été écartés. Dans le cas des échantillons conservés, le modèle estimera la moyenne des notes des différents membres du jury. Ici, 56 essais sont traités, dont la qualité sonore est évaluée par quatre experts en général.

Le phénomène de combustion se répétant périodiquement dans chaque cylindre [10], l'évolution de la pression en cylindre de chaque cycle est extraite du signal total et étudiée séparément.

Chaque cycle est ensuite décomposé en trois signaux [6],

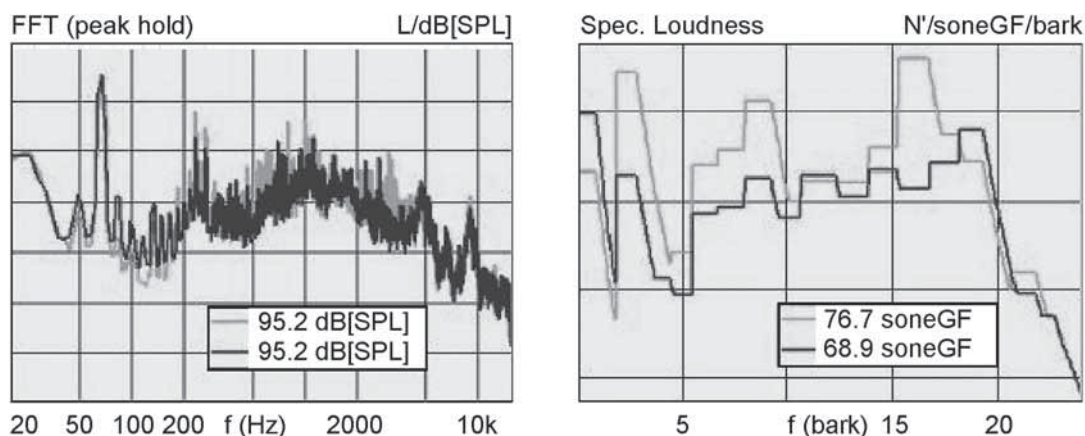


Fig. 2 : Exemple d'analyse psychoacoustique

correspondants aux trois phénomènes physiques principaux intervenants lors d'un cycle et susceptibles d'être à l'origine de la gêne sonore traduite par le jury sous forme de note : compression, combustion et résonance. La figure 3 présente un exemple de cette décomposition, dans les domaines temporel et fréquentiel, pour le même essai à 2 000 rpm et 48 % de charge que celui de la figure 2.

La "compression" est la variation, augmentation puis diminution, de pression due à la variation de volume créée par le mouvement du piston. Ce signal est donc finalement indépendant de la forme de la combustion bien que lié à la masse d'air apportée par le turbocompresseur. Il n'est donc a priori déterminé que par le régime et la charge et peut être aisément évalué de manière expérimentale ou théorique. Il semble raisonnable de penser que les caractéristiques de ce signal serviront de référence pour évaluer le processus de combustion proprement dit.

La "combustion" caractérise réellement le phénomène de combustion, c'est-à-dire la variation de pression associée à la combustion d'une masse de carburant déterminée par la cartographie du moteur pour un régime et une charge définis. Celle-ci fixe également d'autres paramètres (avance, retard, préinjection, pression de rail, etc.) qui régissent l'évolution de ce signal de combustion proprement dit. Pratiquement, ce dernier est calculé en soustrayant les signaux de compression et de résonance au signal total mesuré.

La "résonance" [11,12,13,14] correspond à l'oscillation (rapide, aux alentours de 10 kHz) des gaz dans la chambre de combustion due à la forte augmentation de pression lors de la combustion. En pratique, elle est obtenue en appliquant un filtre passe-haut au signal initial. La fréquence de coupure utilisée afin de sélectionner le signal de résonance de la manière la plus correcte possible a été empiriquement définie en fonction de la vitesse de rotation.

résonance est divisé par son homologue calculé à partir du signal de compression.

Bien que peu courante, cette méthode s'est avérée plus simple, plus efficace et physiquement plus cohérente que d'autres plus classiques comme les analyses temps-fréquence type Wavelet [15,16] ou les transformations de Hilbert et Wigner-Ville [13,14].

À ce stade également, de nombreuses techniques statistiques approfondies, comme celles des composants principaux et des réseaux neuronaux, ont été testées. Cependant, la solution qui a été retenue se base sur une régression multiple, aussi performante et permettant de savoir concrètement quels paramètres sont les plus influents.

Chaque terme est alors considéré comme un phénomène qui empire la note idéale de 10 et s'annule dans le cas sans combustion (donc sans résonance également). Un tel essai serait donc logiquement accrédité de la note maximale de 10 par le modèle.

On cherche ensuite en vue du résultat final à limiter au maximum le nombre de termes afin de réduire le degré de liberté du problème, tout en préservant de bonnes caractéristiques statistiques. Pour cela, on se base dans un premier temps sur les paramètres qui s'ajustent le mieux avec la note (c'est-à-dire qui font preuve de la plus forte dépendance linéaire avec celle-ci) et on en ajoute d'autres peu à peu de manière à diminuer l'erreur et que le nouveau paramètre soit toujours significatif avec un niveau de confiance supérieur à 95 %.

Pour savoir si le modèle de régression linéaire multiple est fiable, on a recours à plusieurs indicateurs classiques : erreur relative, erreur absolue moyenne, erreur maximale, coefficient de corrélation, erreur standard, ajustement par la méthode des moindres carrés.

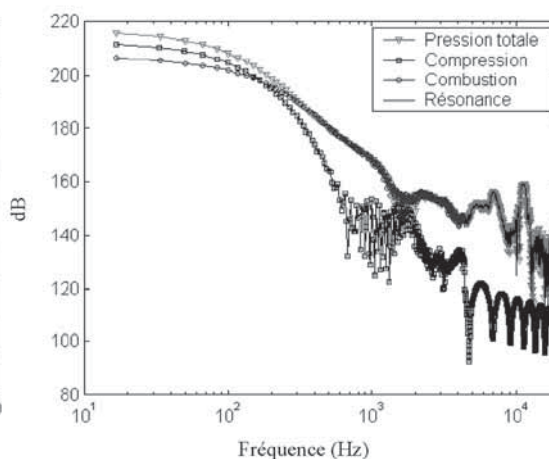
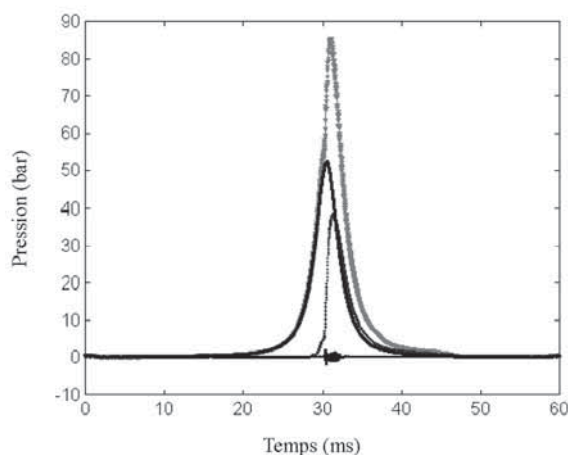


Fig. 3 : Exemple de décomposition de la pression totale

Une fois réalisée cette décomposition de la pression, plusieurs paramètres simples mais susceptibles d'être significatifs pour cette étude sont calculés pour chacun des trois sous-signaux de chaque cycle et de chaque cylindre des 56 essais valides.

Plus précisément, ces indicateurs présumés sont les valeurs maximales ou moyennes, la durée et l'énergie des différents signaux. Seule la valeur moyenne sur tous les cycles et tous les cylindres est prise en compte. Afin d'adimensionner les indicateurs et de leur donner ainsi davantage de sens physique, chacun d'eux relatif à la combustion ou à la

Résultats

À l'issue du travail précédent, plusieurs solutions sont envisageables mais deux indicateurs principaux se détachent dans tous les cas. Ils correspondent à l'énergie de résonance et à la dérivée maximale de pression de combustion.

Le premier est significatif de l'excitation apportée au bloc moteur par résonance de la chambre de combustion alors que le second caractérise la brusque augmentation de pression (ou haute vitesse de combustion responsable du célèbre "knock" [9]) au moment de la combustion principale.

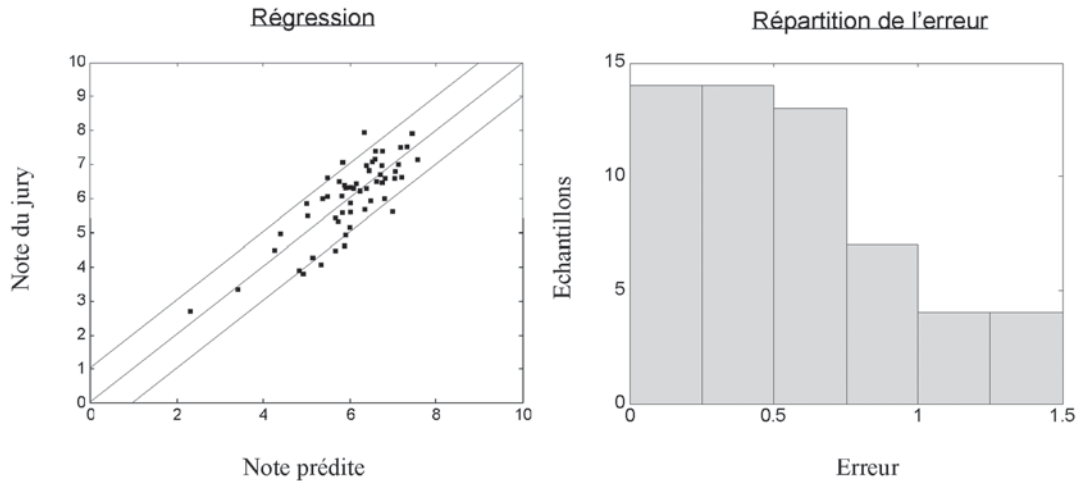


Fig. 4 : Courbes de régression et de répartition de l'erreur obtenues à partir des deux indicateurs principaux

La figure 4 présente un exemple de courbes de régression et de répartition de l'erreur obtenues. Avec une erreur moyenne de 0,55 (sur 10), ce résultat est satisfaisant. Ce modèle a été retenu même si des résultats statistiquement meilleurs mais probablement moins robustes et avec moins de cohérence physique peuvent être obtenus en ajoutant des variables au modèle ou en ayant recours à d'autres techniques statistiques.

De plus, à partir de la figure 5, il est facilement vérifiable que la note empire lorsque les indicateurs augmentent : plus la résonance est importante et la brusque augmentation de pression élevée, plus le bruit est gênant et la note faible.

Il y apparaît clairement le rôle cumulé des deux indicateurs même si celui lié au «knock» semble avoir un peu plus d'importance : dans la plupart des cas, lorsque celui-ci est fixe, les variations de l'indicateur de résonance semblent légèrement moindres que dans le cas inverse.

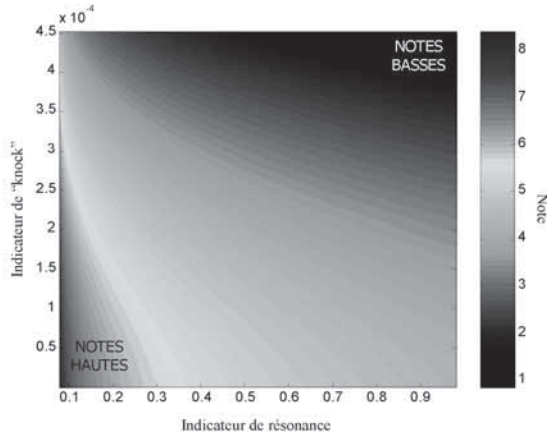


Fig. 5 : Influence respective des deux indicateurs principaux

Des études complémentaires ont confirmé l'égale influence des deux indicateurs sur l'ensemble des essais même si, à bas régime, zone pour laquelle le bruit de combustion est particulièrement important dans le bruit total perçu, l'indicateur de «knock» est plus influent. De plus, les deux indicateurs seraient fortement corrélés à haut régime.

Dans le cadre d'une première tentative visant à améliorer ces résultats, l'angle «critique» correspondant au gradient maximum de pression est pris en compte afin de traduire l'influence des forces exercées sur les bielles et le vilebrequin. Les améliorations statistiques ainsi obtenues sont présentées sur la figure 6. L'erreur moyenne, par exemple, diminue jusqu'à 0,45 (sur 10).

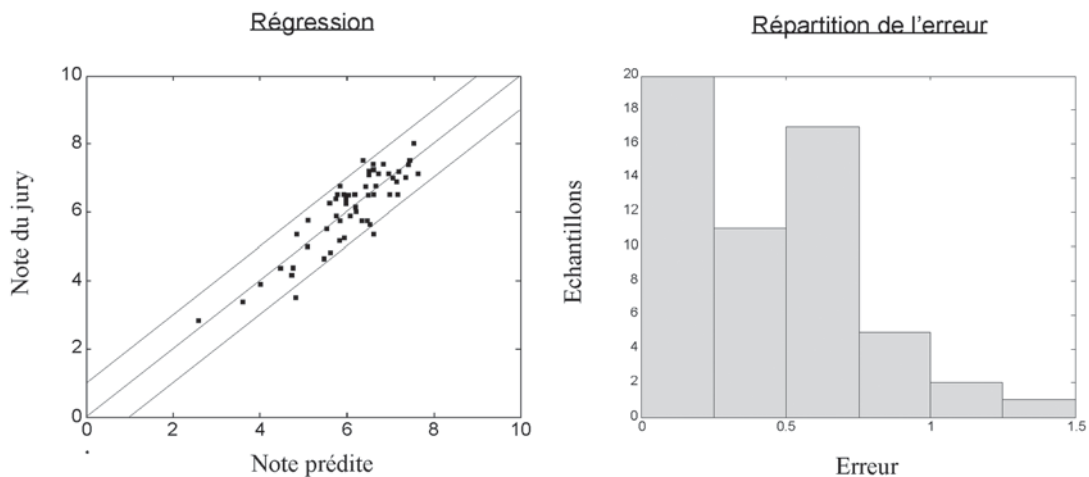


Fig. 6 : Courbes de régression et de répartition de l'erreur obtenues à partir de trois indicateurs

Conclusions et perspectives

En premier lieu, le processus complet de propagation du bruit depuis l'excitation dans les cylindres jusqu'à son évaluation subjective a été éclairci. En particulier, la nécessité de travailler avec des indicateurs de la combustion a été mise en évidence, en raison des multiples non-linéarités du problème.

En conséquence, le raisonnement logique amenant à l'élaboration d'un modèle de prédiction de la sensation sonore ainsi que la cohérence physique associée ont été décrits.

Ce sont donc principalement la résonance dans la chambre de combustion et la brusque augmentation de pression pendant le «knock» qui causent la gêne acoustique décrite par le jury d'experts.

Notons que chaque indicateur de la combustion est probablement responsable d'une sensation acoustique concrète. Celle-ci pourrait être explicitée grâce à une étude psychoacoustique plus poussée.

Un modèle basique mais tout de même fi

able à 0,55 point sur 10 a donc été construit et réserve surtout de larges possibilités d'amélioration. Par exemple, la fréquence de coupure utilisée afin de filtrer le signal de résonance pourrait être optimisée. Ensuite différents paramètres, autres que l'angle critique, pourraient être pris en compte. Finalement, chercher une relation entre les deux indicateurs principaux ou entre eux et les conditions de fonctionnement ou d'injection serait intéressant. Pour cela, une autre campagne d'essais, plus vaste et plus ciblée, devra être lancée.

De premiers travaux complémentaires basés sur des analyses 3D CFD [17] permettent également de confirmer et d'étendre ces tendances, en particulier concernant l'étude de la résonance.

En tenant compte de toutes ces remarques, il semble donc possible prochainement d'optimiser acoustiquement la combustion de chaque nouveau moteur dès sa phase de développement si bien sûr les ajustements nécessaires restent compatibles avec les performances et le niveau de pollution requis.

Références bibliographiques

- [1] Otto, N. ; Amman, S. ; Eaton, C. ; Lake, S., "Guidelines for jury evaluations of automotive sounds " (1999), SAE paper 1999-01-1922.
- [2] Heywood, J.B., "Fluid motion within the cylinder of internal combustion engines -The 1986 Freeman Scholar Lecture" (1986), Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME 109, pp. 3-35.
- [3] Russel, M.F. ; Haworth, R., "Combustion noise from High Speed Direct Injection Diesel engines" (1985), SAE paper 850973.
- [4] Rust, A. ; Plueger, M., "Future demands for Diesel engine Acoustics" (2000), Proceedings of the international SIA congress "What challenges for the Diesel engine of the year 2000 and beyond", Lyon, France.
- [5] Saad, A.A.A. ; El-Sebai, N.A., "Combustion noise prediction inside Diesel engine" (1999), SAE paper 1999-01-1774.
- [6] Scheuren, J. ; Widman, U. ; Winkler, J., "Active noise control and sound quality design in motor vehicles" (1999), SAE paper 1999-01-1846.
- [7] Alt, N.W. ; Wiehagen, N. ; Steffens, C. ; Heuer, S. "Comprehensive combustion noise optimisation" (2001), SAE paper 2001-01-1510.
- [8] Anderton, D., "Relation between combustion system and noise" (1979), SAE paper 790270.
- [9] Osawa, H. ; Nakada, T., "Pseudo cylinder pressure excitation for analyzing the noise characteristics of the engine structure" (1999), JSAE Review 20, pp. 67-72.
- [10] Schmillen, K. ; Wolschendorf, J., "Cycle-to-cycle variations of combustion noise in Diesel engines" (1989), SAE paper 890129.
- [11] Eriksson, L.J., "Higher-order mode effects in circular ducts and expansion chambers" (1980), Journal of the Acoustical Society of America 68, pp. 545-550.
- [12] Rask, R.B. ; Saxena, V., "Influence of the geometry on flow in the combustion chamber of a Direct-Injection Diesel engine" (1985), Proc. ASME winter annual meeting, pp. 19-28.
- [13] Ren, Y. ; Randall, R.B. ; Milton, B.E., "Influence of the resonant frequency on control of knock in Diesel engines" (1999), ImechE paper D04767.
- [14] Stankovic, L. ; Böhme, J.F., "Time-frequency analysis of multiple resonances in combustion engine signals" (1999), Signal Processing 79, pp. 15-28.
- [15] Desantes, J.M. ; Torregrosa, A.J. ; Broatch, A., "Wavelet transform applied to combustion noise analysis in High-Speed DI Diesel engines" (2001), SAE paper 2001-01-1545.
- [16] Yajima, Y. ; Nakashima, K., "New measuring technique of cylinder pressure and its application to combustion noise reduction. Time-frequency analysis of combustion excitation using wavelet transform analysis" (1998), JSAE Review 19, pp. 277-282.
- [17] Torregrosa, A. ; Broatch, A., Marant, V. ; Beauge, Y., "Analysis of combustion chamber resonance in DI automotive Diesel engines" (2002), en révision pour Thiesel 2002 Conference on thermo- and fluid-dynamic processes in Diesel engines, Valencia, Espagne.