

CONCEPTION DES ECHAPPEMENTS POUR LES MOTEURS A L'ESSENCE

Andrei BUBULETE¹, Ionel SIMION²

In this article, we will study the necessary procedures to carry out the production of an assembly which has the role of disposing of the gas produced by the engine with internal combustion. It's not simple, because there are several other loads in the task book, and that means an engineering compromise that's hard to balance. The idea of study is to show the ways to ensure the vibratory reliability of the whole, by optimizing its fixings.

Dans cet article, nous allons étudier les procédures nécessaires à effectuer afin de réaliser la production d'un ensemble qui a le rôle de disposer du gaz produit par le moteur avec combustion interne. Ce n'est pas simple, car il y a plusieurs d'autres charges dans le cahier de tâches, et ça signifie un compromis d'ingénierie difficile à équilibrer. L'idée d'étude est à montrer les façons d'assurer la fiabilité vibratoire de l'ensemble, par l'optimisation de ses fixations.

Mots clés: simulations vibratoires, simulations thermomécaniques, rigidité, fiabilité.

1. Introduction

Ce papier décrit le travail de simulations et essais physiques qui sont effectuées afin de modéliser et configurer un collecteur d'échappement moteur essence avec ou sans turbocompresseur.

Le but principal est de faire une synthèse des étapes à parcourir, d'un besoin initial, jusqu'au produit final à vendre. Il s'agit ici d'un modèle qui doit être commencé à concevoir, réalisé à partir des modèles similaires existantes sur le marché, de producteurs comme Renault, Nissan, Mitsubishi.

D'habitude, le matériel choisi est l'acier inoxydable pour ses caractéristiques physiques est thermomécaniques très performantes.

Le collecteur échappement est normalement la liaison entre la face échappement de la culasse et le catalyseur, ou convertisseur catalytique. Le collecteur échappement est prévu avec une bride d'entrée qui est l'interface avec

¹ Doctorant, École doctorale d'ingénierie et management des systèmes technologiques, Université POLITEHNICA de Bucarest, Roumanie, e-mail: bubu_slk@yahoo.com

² Professeur, Département de génie graphique et design industriel, Université POLITEHNICA de Bucarest, Roumanie, e-mail: ionel.simion@upb.ro

la culasse du moteur, et il y a aussi un joint entre les deux, pour assurer l'étanchéité du gaz.

Sachant que l'échappement traverse presque tout le véhicule, il doit être écranée thermiquement. Le gaz a une température de $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ et cet ensemble peut endommager les éléments complémentaires du véhicule. Ces éléments chauffent beaucoup et sont ensuite refroidis lorsque le véhicule est arrêté, de sorte qu'ils sont soumis à plusieurs cycles d'expansion qui doivent être simulés pour mesurer la fiabilité globale. [1]

Pour ça on utilise des méthodes de calcul avec des éléments finis (FEA), pour simuler le comportement vibratoire des pièces et les performances thermomécaniques.

Maintenant il y a plusieurs types de collecteurs d'échappement, selon les besoins. Une première classification sera la technologie de production :

- Collecteur forgé (Fig.1). L'avantage de ce type de collecteur est la fiabilité et rigidité mécanique et aussi l'acoustique. Les formes compliquées sont possible à réaliser. L'inconvénient est le prix. Les producteurs en masse qui produisent des modèles en grands volumes, préfèrent la solution soudée.



Fig. 1. Collecteur échappement forgé [3]

- Collecteur en tôle soudée (Fig.2). Dans le cas représenté dans la figure 2, la pièce n'est pas totalement en tôle soudée, la bride d'entrée est toujours forgée, mais les constructeurs qui comptent sur les modèles entry-level peuvent choisir la solution avec cette flanche même en tôle emboutie dans une forme qui la confère la rigidité nécessaire. Cette solution est bien sûr plus difficile à optimiser de point de vue acoustique et

elle est moins fiable, la rigidité étant plus faible, mais si ces critères peuvent être respectés par un bon développement, le prix est imbattable.



Fig. 2. Collecteur échappement soudé [4]

Une autre charge dans le cahier étant la dépollution, dans ce monde obsédé par les émissions, les moteurs doivent être obligatoirement équipées avec de Convertisseurs Catalytiques, ou de cas-a-cas avec des Filtres à Particules. Ca va dicter, bien sûr, la forme du collecteur échappement, en devenant un «catacollecteur», ou le collecteur peut rester pareil ceux en dessus si le catalyseur est placé sur la ligne échappement (Fig.3).



Fig. 3. Catacollecteur [5]

La solution présentée dans la figure 3 contient le catalyseur également incorporée dans l'ensemble du collecteur d'échappement. La raison est que le catalyseur a la meilleure performance à une température spécifique, donc lors qu'il est chauffé par le gaz. Ça signifie que, plus il se rapproche de flanche d'entrée, plus vite il arrive à la température nécessaire, ayant l'avantage d'incorporer le catalyseur avec le collecteur. Mais l'inconvénient est de l'équilibrer en termes de vibrations, ayant une masse supplémentaire. Et aussi il occupera plus d'espace dans le compartiment moteur.

2. Simulations pour validation

Connaissant toutes les fonctions de cette pièce, on y va établir comment assurer qu'elle les effectue, virtuellement pour l'instante.

Tout d'abord, l'ensemble développé doit entrer dans le compartiment moteur. Nous devons donc vérifier avec la modélisation 3D, s'il y a suffisamment d'espace avec les composants environnants.



Fig. 4. Catacollecteur dans l'environnement moteur [6]

Le collecteur d'échappement peut avoir les meilleures performances de résistance mécanique vibratoire, thermique et perte de charge, mais c'est pour rien si il ne pas marche dans le moteur. Alors, il y a des contraintes géométriques

pour les autres éléments du moteur. En outre, pour les autres pièces sensibles, il faut plus d'espace pour les effets thermiques.

Une règle de sûreté serait de prévoir le collecteur échappement avec un écran thermique qui assure une température à la surface de moins que 400 °C et à garder les éléments en plastique ou autres composants à une distance de 50 mm à moins.

2.1. Essais dynamique du gaz

La deuxième condition de cette pièce est d'être effectivement un catalyseur, pour exécuter sa fonction, et pour ça il a besoin d'une géométrie qui permette un flux de gaz uniforme. Ce fait est également nécessaire pour les performances des éléments de dépollution. Dépendent de la norme de dépollution qui doit être atteinte, le catacollecteur peut contenir un catalyseur 3 voies ou un filtre à particule aussi.

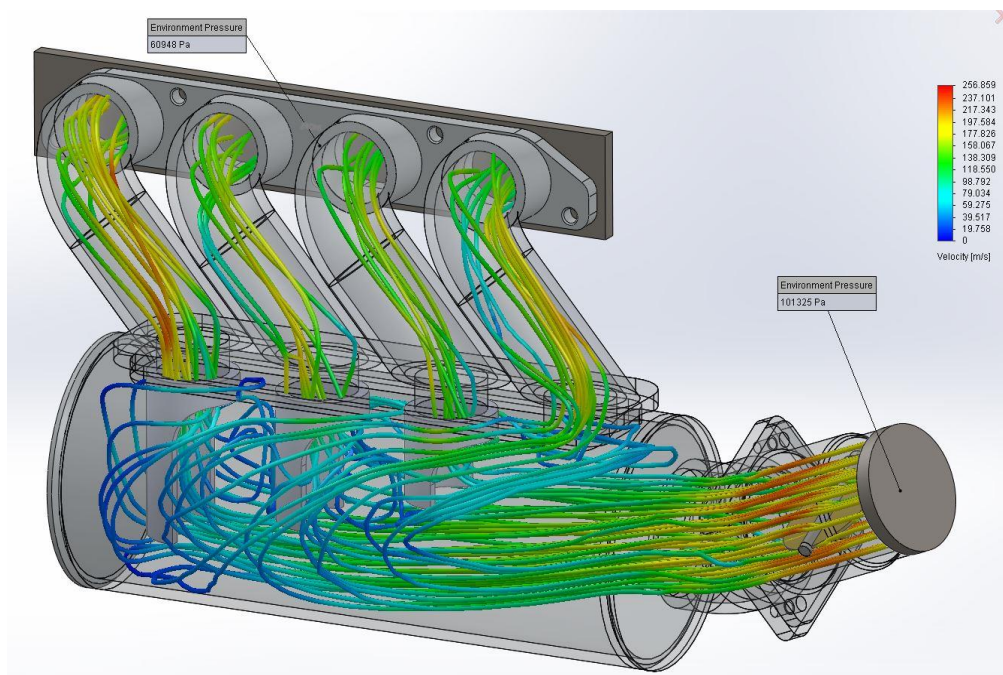


Fig. 5. Graphique Vitesse gaz CFD collecteur échappement [7]

Les contraintes qui celui-là pose sont bien sûr, celles d'architecture (il est très volumineux), mais de point de vue CFD (computational fluid dynamics), il doit être bien traversée par le gaz pour bien fonctionner.

Pour les meilleures performances de dépollution, il doit arriver à une température haute, donc le plus proche est-il de la face échappement, le plus vite il arrive à cette température. [2]

Les simulations CFD ont l'objectif de montrer si le flux de gaz n'est pas obturé (la contre pression doit être la plus petite possible), que la céramique du catalyseur est bien traversé par le gaz pour assurer les performances de dépollution.

Aussi les deux sondes d'oxygène doivent être également traversées par un flux consistant de gaz pour détecter correctement la quantité d'oxygène contenu.

Ces résultats aident à mieux modeler les conduits du collecteur par rapport au catalyseur et aussi de positionner les sondes O_2 , avant de lancer les prototypes, qui d'habitude ne sont pas instrumentées avec manomètres.

2.2. Simulations thermomécaniques

Sachant que la pièce en question est traversée par le gaz de combustion à une température d'environ $900^{\circ}C$, ça signifie qu'elle subira plusieurs cycles de dilatation et aussi de refroidissement. D'habitude ce type de simulation n'est pas la trop précise (il y a une erreur d'environ 40% entre le résultat de la simulation virtuelle et les essayes physiques), mais elle est très importante car elle montre les potentiels points faibles de la pièce ou les fissures peuvent apparaitre.

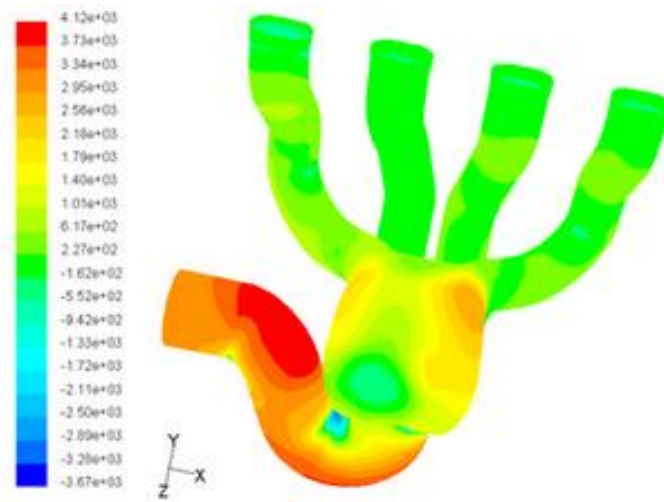


Fig. 6. Graphique Vitesse gaz CFD collecteur échappement [8]

Dans l'image représentée dans Fig.6 il y a une carte thermique d'un catacollecteur, qui montre les points plus sollicités de la pièce, et dans l'état de

développement peut imposer des renforcements locaux, ou de permettre la dilatation.

Pendant cette essaye on peut obtenir la carte thermique extérieure qui nous aide à établir les zones dangereuses pour les composants environnantes, et où il y aura besoin d'écrantage thermique plus fort.

3. Calculations vibratoires

Maintenant revenons à l'objectif principal de cet article, d'étudier le comportement du catacollecteur de point de vue fiabilité vibratoire en cas différentes de fixation/béquillage.

Le rôle de ces simulations avec des éléments finis est de prévoir comment la pièce résiste en fonctionnement du moteur qui produit des forts vibrations qui peuvent arriver à détruire la pièce avant les cycles de dilatation mentionnées au-dessus.

Alors c'est une essaye de validation très importante et plus précise que celle thermomécanique, mais on doit avoir un équilibre entre les deux performances, car l'amélioration d'une peut conduire à l'aggravation de l'autre.

La raison est que pour prévenir une rupture en dilatation, il faut que la pièce être flexible, tandis que pour résister aux les vibrations, la rigidité est le mot clef.

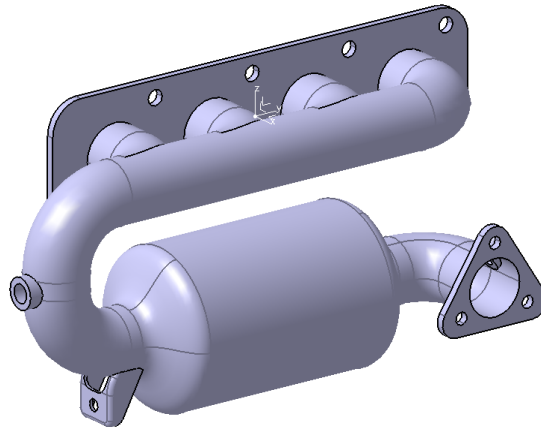


Fig. 7. Catacollecteur désigné

Ce type d'architecture survient à raison des normes de dépollution de plus en plus sévères. Un catacollecteur de série est d'habitude positionné verticalement. Mais pour arriver à Euro 6d par exemple, le monolithe doit être plus volumineux, alors il faut adopter une architecture horizontale, pour adapter le catacollecteur dans le compartiment moteur ou il est contraint par la colonne de direction par exemple.

La modélisation du catacollecteur en utilisant Catia V5, pour un moteur en 4 cylindres, l'architecture horizontale, le corps catalyseur en dessous la conduit coté flanche d'entrée, la flanche de sortie en 3 points de fixation est présentée dans Fig. 7.

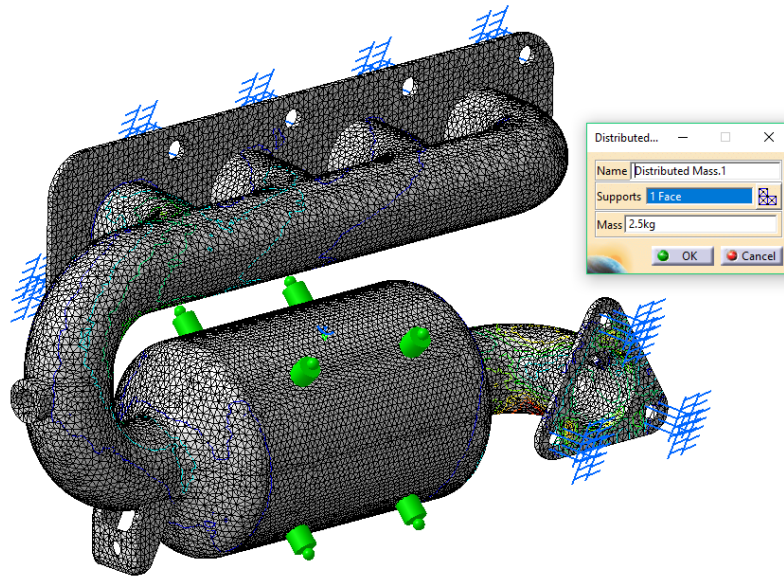


Fig. 8. Données d'entrée simulation vibratoire

Pour ces simulations, on a utilisé le même software que pour modeler le catacollecteur, Catia V5 (module Analysis & Simulations), pour être plus facile de le discrétiser, mais, selon [10] et [11], les constructeurs utilisent programmes dédiés pour ces applications, comme Ansys, Adams, Matlab Simulink etc.

Comme il est illustré dans l'image représentée dans Fig. 8, les points de fixation pour la simulation sont les deux flanches, d'entrée et de sortie, qui représentent le montage sur la culasse et la ligne d'échappement respectivement. D'habitude, la ligne d'échappement n'est pas rigide, il y a une interface flexible avec le collecteur mais on fait l'essai sur un cas simplifié juste pour avoir une valeur de fréquence préliminaire.

Pour simuler la face chaude d'échappement, qui affecte la rigidité du matériau, la valeur du module Young a été abaissée de $2e+011N_m2$ à $1e+011N_m2$.

Il y a aussi une masse supplémentaire de 2.5 kg, qui représente les céramiques de catalyseur, leurs gaines de fixation, et l'isolation thermique, valeur de masse étant estimée.

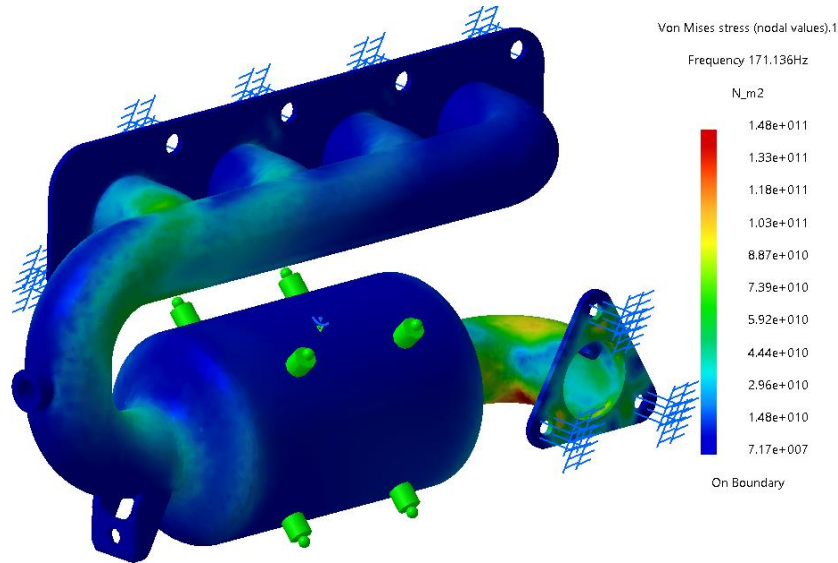


Fig. 9. Première forme modale

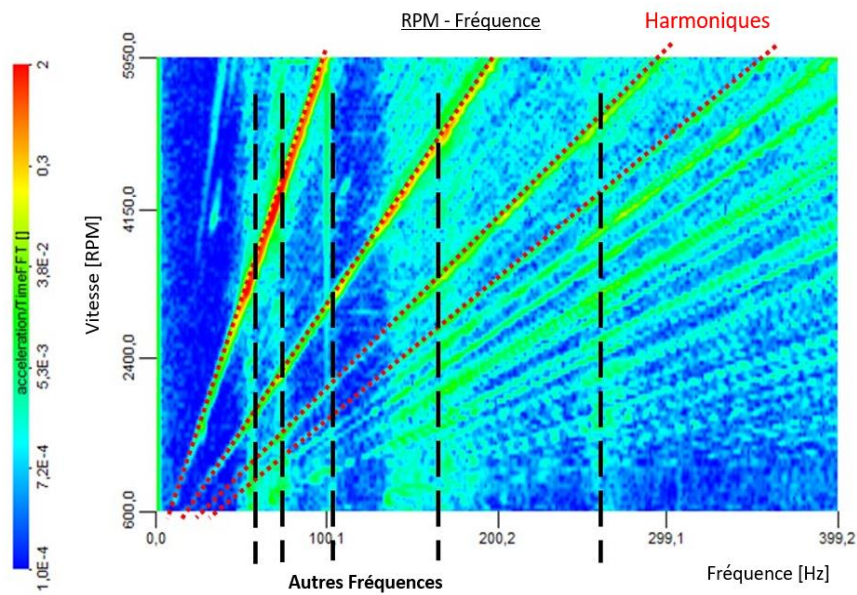


Fig. 10. Carte harmonique selon vitesse moteur [9]

La valeur de fréquence obtenue pour cette configuration est 171 Hz, pour la première forme modale. Pour les moteurs en 4 cylindres comme celui sur lequel ce collecteur peut être monté, la valeur à laquelle les pièces entrent en résonance est environ de 240 Hz, selon l'image dans Fig.10. Le point avec la plus grande sollicitation est cotée bride de sortie.

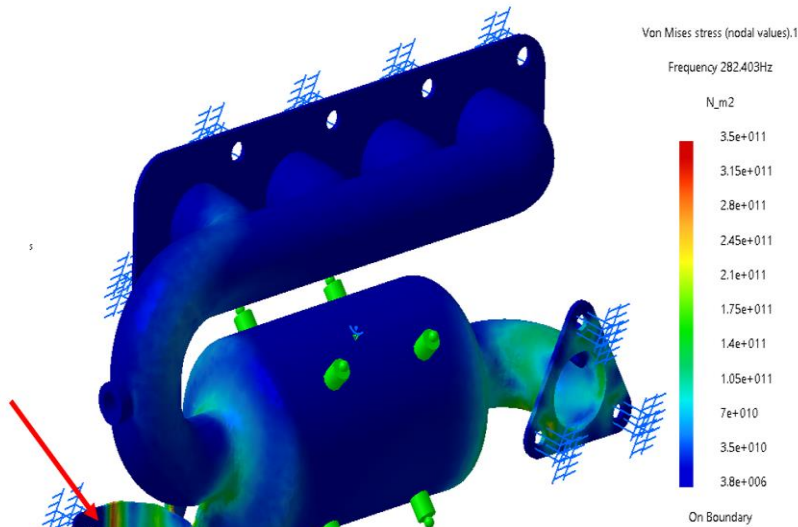


Fig. 11. Résultat après renforcement

Dans l'image représentée dans Fig. 11 on peut voir la différence énorme qu'une béquille supplémentaire à l'épaisseur de 2 mm peut le faire, en prenant le plus grand point de tension et enlever la fréquence de la première forme modale avec plus de 100Hz.

L'effet est si significatif car le point de fixation ajouté est juste au milieu entre les deux points précédents, les brides d'entrée/sortie, et naturellement prend la plupart des sollicitations vibratoires.

Cette béquille supplémentaire (Fig. 12) aura besoin d'un bossage ajouté sur le carter cylindre pour se fixer, mais ce n'est pas la plus difficile et coûteuse modification pour une tellement grande amélioration de prestation vibratoire.

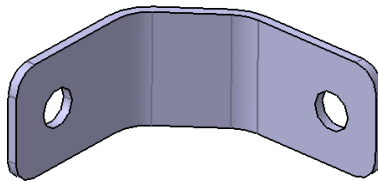


Fig. 12. Béquille intermédiaire

Pour encore enlever cette valeur, le béquillage peut subir encore plus des modifications/optimisations.

Par exemple, c'est visible dans la Fig. 13 que, après l'ajoute de la béquille intermédiaire, les points de tension MAXI ont été déplacés du conduit de sortie sur la béquille elle-même.

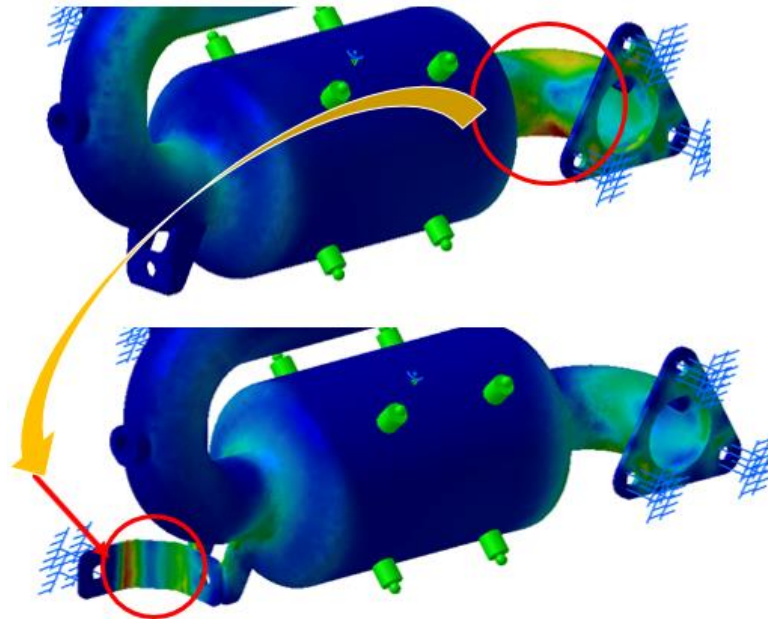


Fig. 13. Déplacement des points de tension sur la béquille.

L'ajout d'une bordé levée selon l'image représentée dans la Fig. 14, aidera la dispersion des points de tension et augmentera la rigidité de la béquille.

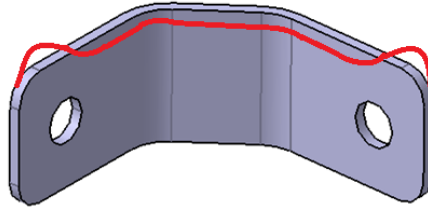


Fig. 14. Proposition optimisation béquille.

La faisabilité de la solution c'est à décider en prenant en compte la valeur de la fréquence obtenue par rapport au cout supplémentaire d'industrialisation de la béquille modifiée.

6. Conclusions

Cet article n'est qu'un court tour de table de l'activité dans la responsabilité d'un concepteur Renault, c'est juste pour donner une idée, et pas un projet concret et existant. La géométrie modelée est similaire à ce qui existe, mais pas représentative a un produit en série sur le marché.

Il présente une analyse du processus de conception d'échappement pour les moteurs à essence. De plus, des solutions simples et efficaces ont été présentées, ce qui a conduit à une performance accrue.

Certaines des conclusions de la pratique sont les suivants :

- Le développement d'échappement moteur est une tâche compliquée, élaborée, avec un volume grand de travail et plusieurs boucles de validation.
- Une seule pièce, pratiquement, doit assurer des prestations variées, vibratoires, thermomécanique, dynamiques, de dépollution, etc. Pour la développer, il y a besoin d'une équipe spécialisée dans chaque domaine d'activité.
- Pour la performance acoustique et de fiabilité vibratoire les solutions simples sont souvent les meilleurs.
- Les béquilles offrent un grand aide pour arriver aux objectifs de résistance nécessaire. Leur forme doit être simple et leur longueur tant courte possible.
- L'implémentation du catacollecteur dans le compartiment moteur nécessite une collaboration avec les équipes d'architecture et de boîtes vitesses, pour éviter les interférences avec leurs éléments.
- La conception des filtres à particules nécessite l'implémentation des plusieurs d'autres composants sensibles comme le capteur de température, de pression et ses tuyaux en caoutchouc.

B I B L I O G R A P H I E

- [1]. Meda, L., Shu, Y., and Romzek, M., Exhaust System Manifold Development, in SAE Technical Paper, 2012-01-0643, 2012.
- [2]. Marupilla Akhil Teja*, Katari Ayyappa, Sunny Katam and Panga Anusha, Analysis of Exhaust Manifold using Computational Fluid Dynamics, in Research Article SIR C R Reddy College of Engineering, Andhra University, Vizag, India, July 28, 2016
- [3]. *** <http://www.buzzle.com>
- [4]. *** <https://www.japspeed.co.uk>
- [5]. *** <http://www.autoanything.com>
- [6]. *** <http://www.cardomain.com>
- [7]. *** <http://www.newcelica.org>
- [8]. *** <http://nestechglobal.com>
- [9]. *** <https://www.dewesoft.com>
- [10]. *** www.quora.com
- [11]. *** www.wizbii.com/company/renault
- [12]. Jack Kane - Exhaust System Technology- The Sound and The Fury – an article from issue 036 of RACE ENGINE TECHNOLOGY MAGAZINE 28 April 2015
http://www.epi-eng.com/piston_engine_technology/exhaust_system_technology.htm
- [13]. Feng, Q., Shen, S., Li, M., Li, Z. et al., "Catalytic Characteristic and Application Performance of Catalyzed DPFs Coated with Various Content of Precious Metal in China," SAE Technical Paper 2017-01-2379, 2017.
<http://papers.sae.org/2017-01-2379/>