

Potentiel des concepts de catalyseur pour atteindre les limites d'émission SULEV

20^{ème} Symposium international sur les moteurs
6 – 7 Mai 1999 à Vienne

**Dipl. Ing. Wolfgang Maus, Dipl. Ing. Rolf Brück, Dipl. Ing. Peter Hirth,
Dipl. Ing. Jan Hodgson, Dr. Ing. Manuel Presti**
Emitec GmbH, Lohmar

Résumé

Le respect des futures limites d'émission de gaz d'échappement, tel que par exemple de la législation SULEV en Californie, va avoir une influence déterminante sur la mise en place de concepts d'entraînement et de combustibles. Pour assurer ces basses émissions, il va falloir développer de nouveaux systèmes de catalyseurs plus efficaces. Dans un programme d'essai, sur un banc d'essais dynamique pour moteurs, des catalyseurs passifs à support métallique avec différentes densités d'alvéoles et d'épaisseurs de feuilles, et des systèmes catalytiques chauffés ont été soumis au test FTP. Les calculs catalytiques avec les émissions brutes de différents moteurs montrent le potentiel pour observer les futures limites d'émission de gaz d'échappement SULEV.

1. Introduction

Le développement industriel des nations riches et la répartition du travail qui l'a accompagné entraînent un grand besoin en mobilité individuelle qui semble atteindre aujourd'hui une certaine saturation. Dans les pays de la triade à partir des années soixante, l'objectif politique se décala de l'accroissement de la prospérité vers l'amélioration des conditions de vie. En particulier dans les zones de conurbation, les problèmes apparents concernant l'environnement ont amplement attiré l'attention publique et ont fait passer au premier plan, les mesures pour la santé et la protection de l'environnement. Cela a entraîné à temps dans les pays industriels, des prescriptions pour la protection de l'air et pour les limites d'émission de gaz d'échappement pour les véhicules. Suivant le modèle européen ou américain, on observe maintenant une tendance semblable dans les pays en voie de développement. En ce qui concerne les deux roues, les pays tels que Taiwan, l'Inde et la Chine ont même un rôle précurseur dans la question des réglementations des émissions et dans le traitement complémentaire des gaz d'échappement.

La Californie vise en particulier à cause des immissions dans le bassin de Los Angeles, les émissions les plus basses pour les automobiles. Au lieu de poursuivre uniquement le but final d'autrefois, un Zero Emission Vehicle sous forme de véhicule à batterie, des alternatives de concept telles que les entraînements hybrides ou à pile à combustible sont aussi pris en compte maintenant. La "fin provisoire" de la

législation sur les gaz d'échappement pour les moteurs à explosion est atteinte avec ce que l'on appelle les véhicules SULEV, "Super Ultra Low Emission Vehicle". Déjà en 1997, un concept de véhicule, dont les émissions sont identiques à celles d'un véhicule électrique [1], a été présenté au public. Dans les zones urbaines avec immissions élevées, un tel véhicule peut générer des émissions négatives. Il peut épurer les nuisances dues aux hydrocarbures dans l'environnement.

Tableau 1 : Limites SULEV

	HC [g/m]	CO [g/m]	NOx [g/m]	PM [g/m]
Limites	0.01	1.0	0.02	0.01

De nouvelles limites d'émission plus sévères ne justifieraient pas actuellement l'intérêt réalisable par des coûts disproportionnés, des dépenses d'énergie et une consommation de matières premières. En comparaison, les véhicules électriques, en raison de l'accumulation d'énergie encore chère, lourde et à usage court, ne représentent pas de solutions alternatives aux véhicules avec de tels moteurs à combustion optimisés [2]. Les entraînements à pile à combustible avec reformeur ne présentent actuellement pas d'avantages dans la chaîne générale de rendement, à cause du poids supplémentaire de l'ensemble du système ainsi que de la consommation d'énergie des organes secondaires nécessaires.

Les mesures pour améliorer le rendement du moteur à explosion, telles que la diminution de la puissance de frottement, des mécanismes de distribution variables, des boîtes CVT ou des concepts à mélanges maigres, entraînent aussi bien une diminution de la consommation de carburant et ainsi de l'éjection de CO₂, que la réduction des émissions brutes absolues du moteur.

Le respect des limites SULEV indiquées ci-dessus exige, malgré une émission brute du moteur très basse, de 1,5 g/m dans le test américain FTP (y compris démarrage à froid), un rendement des catalyseurs de plus de 99,3 % pendant l'ensemble du test. Pour le calcul, du résultat de l'ensemble du test, les résultats des sacs (sac 1 : démarrage à froid ; sac 2 : à chaud ; sac 3 : démarrage à chaud) sont pris en considération conformément à la formule suivante.

E = FTP Emissions totales [g/m]

EM1 = Emissions sac 1 [g]

EM2 = Emissions sac 2 [g]

EM3 = Emissions sac 3 [g]

En pratique, dans des conditions optimales, des taux de rendement de 99,95 % à chaud ont déjà pu être détectés. Cela correspond avec l'émission brute mentionnée ci-dessus dans le sac 2, à des émissions HC de 0,0027 g, et dans le sac 3 à 0,0029 g. Il en résulte pour le démarrage à froid et la phase Light-Off dans le sac 1, une émission HC restante, maximale admise de 0,16 g. De tels taux de rendement élevés de 99,95 % à chaud ne peuvent être obtenus qu'avec une régulation de mélange optimale, surtout à l'état instationnaire. Des "peaks gras" entraînent en raison de la capacité limitée d'accumulation de l'oxygène des catalyseurs, en particulier lorsqu'ils sont anciens, une diminution du rendement HC et CO. En raison du taux de conversion d'oxyde nitrique tombant rapidement dans la zone maigre, les "peaks

maigres" ont un effet critique sur l'observation des limites NOx. Une régulation Lambda des cylindres individuels permet en plus de la correction de tolérance des volumes injectés, aussi la possibilité de faire marcher gras ou maigre, de manière ciblée certains cylindres, ce qui augmente le rendement du catalyseur. Les émissions brutes du moteur déterminent, comme il l'est mentionné ci-dessus, le rendement nécessaire du catalyseur et ainsi les besoins en traitement complémentaire. En plus de l'émission brute à chaud, ce qui est particulièrement important sur les véhicules SULEV, ce sont les émissions HC des premières secondes après le démarrage du moteur. La figure 1 montre les émissions HC brutes cumulées de différents véhicules de classe moyenne et le t99,95 nécessaire (moment où un taux de rendement de 99,95 % est atteint au plus tard).

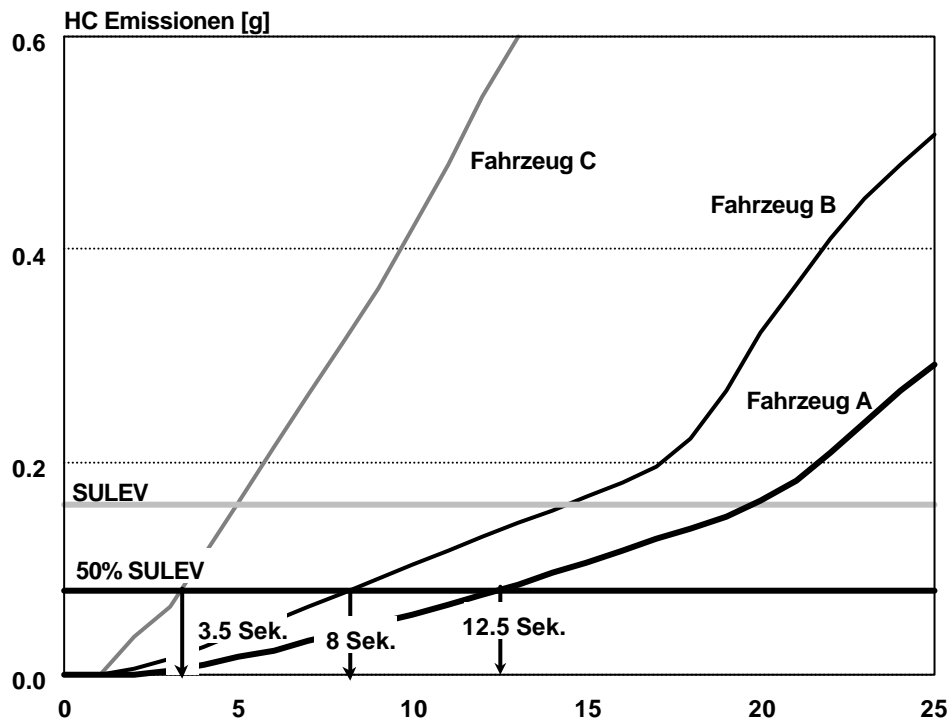


Figure 1 : Emissions HC de différents véhicules de classe moyenne pendant les 25 premières secondes du test FTP et temps Light Off t99,95 nécessaires

Un système non ancien est défini par un objectif de dégagement de 50 % des émissions de la limite admise. Cela donne d'après la figure 1, suivant les émissions brutes, des temps de 3,5 – 12,5 sec pour atteindre un taux de rendement de 99,95 %. Ces temps Light Off sont impératifs pour ne pas dépasser la limite SULEV dans la suite du test de gaz d'échappement.

Avec un système catalytique passif, le catalyseur n'est chauffé que par le gaz d'échappement. La figure 2 montre les températures du gaz avant un catalyseur proche du moteur, de différents concepts de moteurs et de démarrages à froid. Avec ces températures et un débit massique de gaz d'échappement constant de 25 kg/h, à l'aide d'un programme de calcul catalytique, les temps t99,95 d'un catalyseur à support métallique d'une taille de \varnothing 90 x 90 mm, 800 cpsi avec une épaisseur de feuille de 0,03 mm ont été calculés.

On constate que même avec une augmentation de température extrêmement rapide avant catalyseur, des temps Light-Off de 18 secondes sont nécessaires. Si on compare ces temps avec ceux nécessaires pour atteindre un taux de rendement de 99,95 % de la figure 1, on constate que seulement les véhicules avec des émissions brutes extrêmement basses peuvent atteindre la limite visée, uniquement avec des catalyseurs proches du moteur (c.-à-d. sans cat. E).

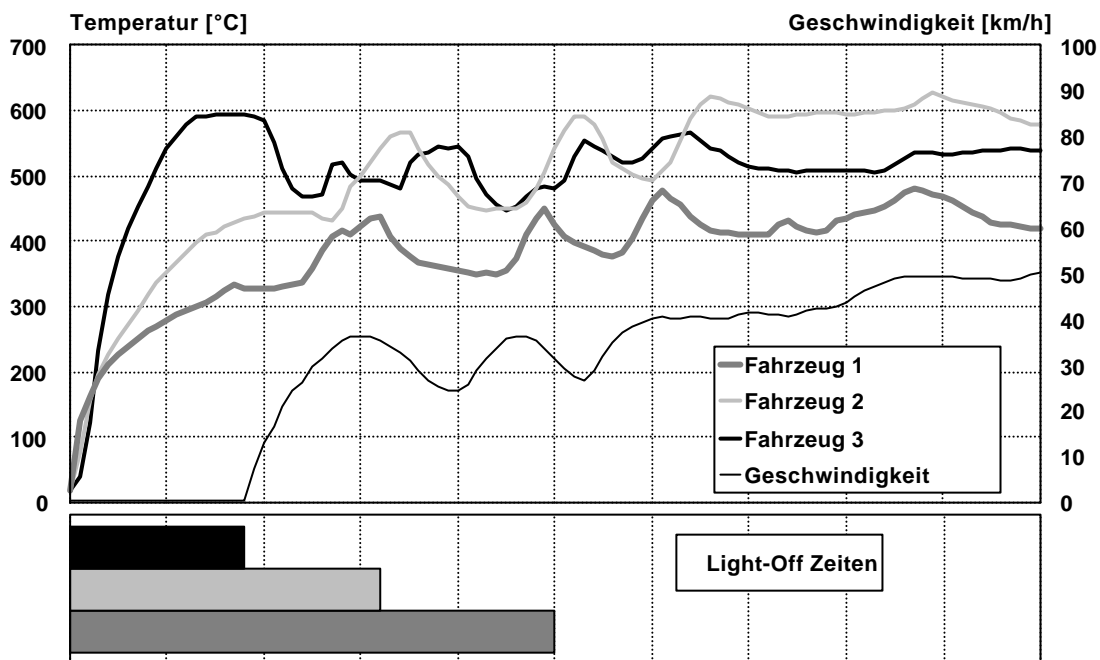


Figure 2 : Températures du gaz avant catalyseur de différents concepts de moteurs et de démarrages à froid à proximité du moteur et temps Light-Off $t_{99,95}$ d'un catalyseur à support métallique $\varnothing 90 \times 90 \text{ mm}$; 800 cps.

Comme cependant de tels moteurs à basses émissions peuvent avoir aussi des inconvénients au niveau puissance et durabilité, ou ne peuvent peut-être pas être développés dans le temps disponible jusqu'en 2003, il faut aussi considérer des solutions alternatives pour le traitement complémentaire des gaz d'échappement et les adapter à la production en série.

2. Concepts de traitements complémentaires des gaz d'échappement

De nombreuses mesures actives et passives de traitements complémentaires des gaz d'échappement telles que p. ex. les catalyseurs proches du moteur, l'adsorbant HC, l'adsorbant intégral, les brûleurs, Exhaust Gas Ignition, les catalyseurs à chauffage électrique et les accumulateurs thermiques latents, ont été examinées dans des tests de gaz d'échappement [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Cependant, en plus des limites d'émission à respecter, la résistance et les possibilités de diagnostic (OBD II) sont également d'une importance déterminante. En outre, le système de traitement complémentaire des gaz d'échappement ne doit pas seulement fonctionner dans le

test spécifique connu mais aussi à long terme dans des conditions de service quotidiennes. Les systèmes qui comparés au test des gaz d'échappement, rejettent en pratique après le démarrage du moteur, nettement plus d'émissions de démarrage à froid et qui donc dégagent plus à cause de la réduction du temps de ralenti, ne peuvent pas être employés – par respect de l'environnement. C'est pourquoi, en plus des catalyseurs près du moteur, uniquement les adsorbants d'hydrocarbures et les catalyseurs à chauffage électrique ont atteint actuellement un niveau de développement permettant la fabrication en série en MJ 2003. Dans le passé, des calculs concernant ces concepts et leurs exigences spécifiques ont déjà été présentés [10].

En résumé, il est possible de dire que les adsorbants HC sont tout à fait capables de stocker temporairement les émissions HC de démarrage à froid jusqu'à ce que le cat. E suivant soit chauffé pour la conversion. Mais l'inconvénient c'est qu'en raison de la masse thermique de l'adsorbant, des puissances de chauffage électriques élevées sont nécessaires [13]. D'autres solutions sont ce que l'on appelle les adsorbants intégraux dont la stabilité thermique n'a pas encore été prouvée surtout lors d'une utilisation à proximité du moteur. Même les systèmes by-pass avec des constructions de clapets complexes dans la conduite de gaz doivent encore prouver leurs aptitudes pour la production en série. Il est possible de considérer un système de cat. E proche du moteur comme une alternative réalisable aux concepts de catalyseurs passifs [10].

Dans un programme de test, les critères de conception pour un système de convertisseur SULEV passif, proche du moteur ont d'abord été examinés.

3. Critères de conception

Dans le passé, les puissances de conversion théoriques et pratiques pour les catalyseurs proches du moteur de différents diamètres (60 – 127 mm), les diamètres, les longueurs et les densités des alvéoles (100 – 600 cpsi) ont déjà été examinés [12]. Un avantage a été trouvé chez les catalyseurs avec un petit diamètre adapté et des densités d'alvéoles élevées. Cependant, une augmentation de la densité des alvéoles à 600 cpsi ne représentait un avantage au démarrage à froid que par la réduction simultanée de l'épaisseur des feuilles de 0,05 à 0,04 mm et ainsi de la capacité thermique spécifique.

Entre-temps, il a été possible avec de nouveaux matériaux de diminuer l'épaisseur des feuilles de métalite en série à 0,03 mm [12] et pour les prototypes même à 0,025 mm (en comparaison : épaisseur du papier 0,1 mm). La figure suivante montre le facteur de pondération du démarrage à froid "Surface géométrique / Capacité thermique" [13] de différents catalyseurs à densités d'alvéoles élevées.

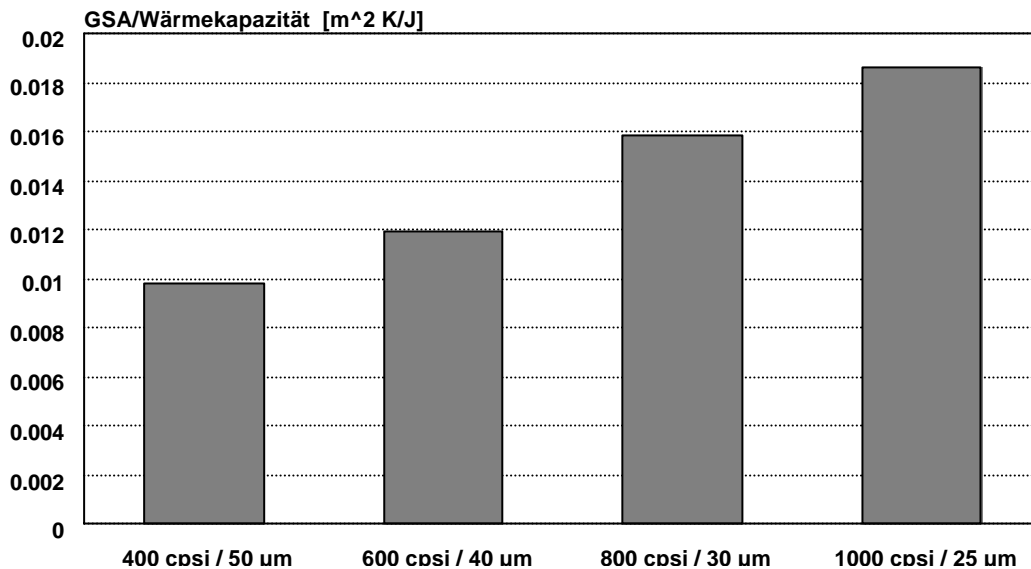


Figure 3 : Facteur de pondération du démarrage à froid "Surface géométrique / Capacité thermique" [13] de différents catalyseurs à densités d'alvéoles élevées (400 – 1000 cpsi).

A l'aide des feuilles ultra fines, le facteur de pondération du démarrage à froid a pu être amélioré jusqu'aux catalyseurs 1000 cpsi.

Dans un programme d'essai, les caractéristiques au démarrage à froid de différents supports de catalyseurs à l'état neuf ont été examinées suivant le test FTP. Les essais ont été réalisés sur un banc d'essais dynamique de moteurs avec mesure modale des gaz d'échappement avant et après catalyseur. Un moteur à 6 cylindres (réglage TLEV) avec 3 collecteurs en 1 a servi de support d'essai.

3.1 Comportement au démarrage à froid

3.1.1 Influence de la densité des alvéoles et de l'épaisseur des feuilles

Pour vérifier l'influence du facteur (théorique) de pondération du démarrage à froid sur les émissions du démarrage à froid, les catalyseurs représentés au tableau 2 ont été soumis au test FTP. Tous les catalyseurs à support métallique avaient les cotes \varnothing 98,4 x 74,5 mm et étaient installés comme catalyseurs uniques dans la conduite des gaz d'échappement.

Tableau 2 : Catalyseurs testés

Densité des alvéoles [cpsi]	400	600	800	1000
Epaisseur des feuilles [mm]	0,05	0,04	0,03	0,025
Facteur de démarrage à froid	0.0098	0.0119	0.0158	0.0186

La figure suivante montre les taux de rendement HC pendant les 100 premières secondes du test FTP. Les résultats sont les valeurs moyennes de plusieurs mesures.

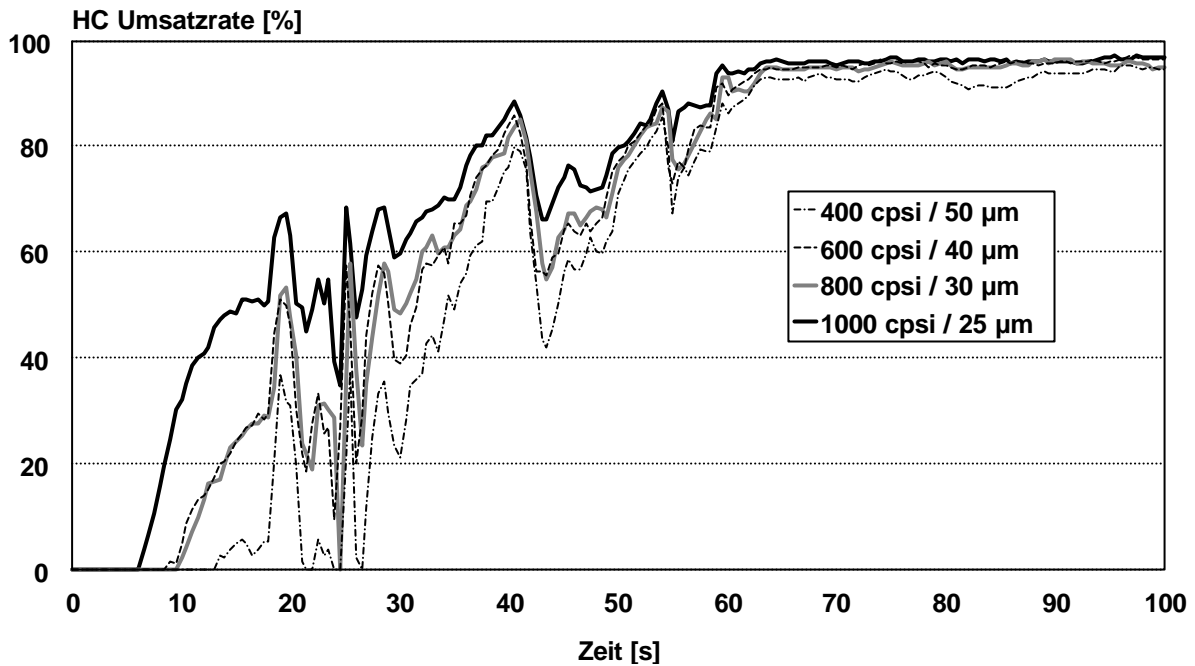


Figure 4 : Taux de rendement HC pendant les 100 premières secondes du test FTP

Le catalyseur 1000 cpsi avec une épaisseur de feuilles de 0,025 mm présente par rapport aux autres, le meilleur comportement au démarrage à froid. Suivant le facteur de pondération du démarrage à froid (figure 3), le support standard 400 cpsi présente le plus mauvais résultat.

Pour mieux représenter les émissions du démarrage à froid, la figure 5 montre les émissions HC cumulées.

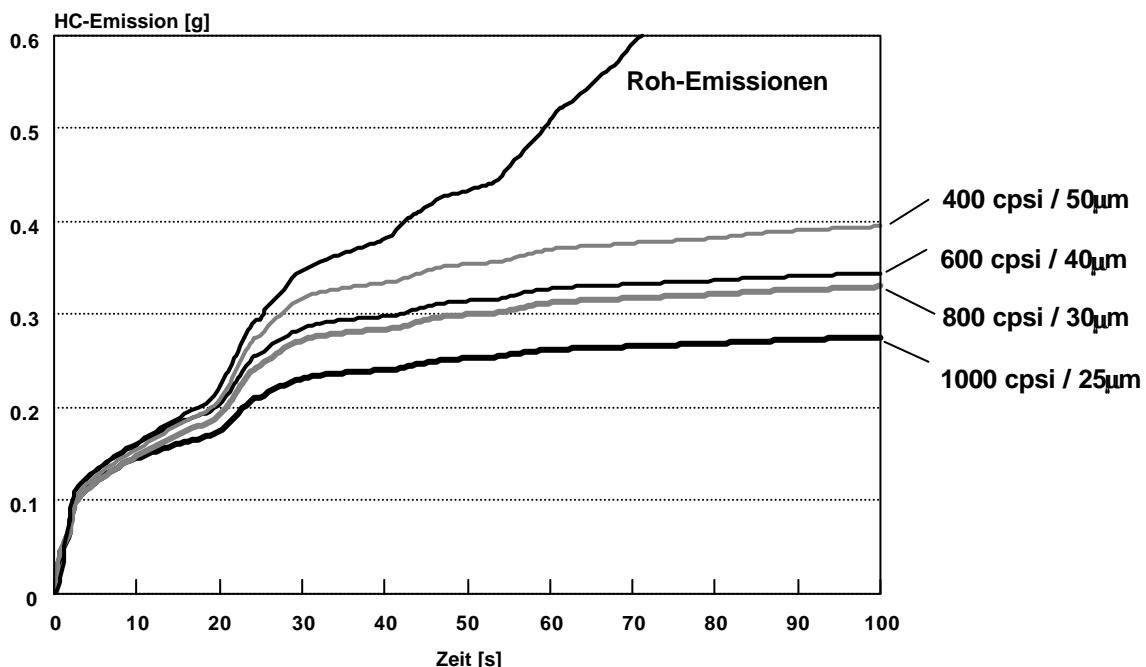


Figure 5 : Emissions HC cumulées pendant les 100 premières secondes du test FTP

Après 100 secondes, le catalyseur 1000 cpsi présente par rapport au support 800 cpsi, un avantage d'émission de 18,6 % et par rapport au support 600 cpsi, un avantage d'émission de 22,6 %. Par rapport au catalyseur standard 400 cpsi/0,05

mm, les émissions HC se sont améliorées de 33,6 % dans la première phase de temps.

3.1.2 Catalyseur chauffé

Le catalyseur chauffé testé avec un catalyseur d'appoint en aval est décrit dans le tableau 3. La puissance de chauffage était de 2000 Watts avec une durée de chauffage de 20 secondes après le démarrage du moteur. Les essais ont montré que cette puissance de chauffage peut être fournie avec une batterie standard sans restriction de la durée de vie [14].

Tableau 3 : Caractéristiques du catalyseur chauffé

Catalyseur chauffé	Catalyseur d'appoint	Volume de catalyseur [l]
Ø 98,4 x 10 mm 400 cpsi; 0,04 mm	Ø 98,4 x 67 mm 800 cpsi; 0,03 mm	0,59

Les émissions HC cumulées au démarrage à froid du test FTP sont représentées à la figure 6.

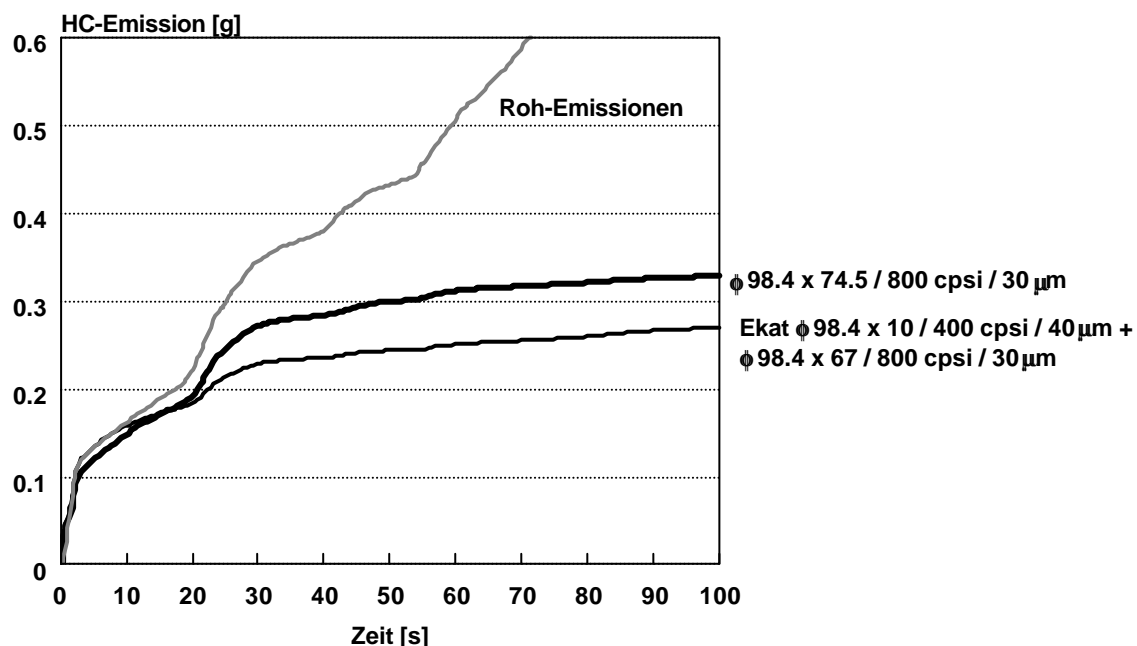


Figure 6 : Emissions HC cumulées pendant les 100 premières secondes du test FTP du catalyseur passif par rapport au système catalytique chauffé correspondant.

Si l'on compare la variante du catalyseur chauffé dans les 100 premières secondes avec la variante passive correspondante (densité des alvéoles, épaisseur des feuilles), le chauffage actif permet d'améliorer les émissions HC de 20,2 %. Il faut faire remarquer que le catalyseur chauffé a été chauffé avec une batterie à part, de manière semblable à un système à 2 batteries, et qu'ainsi l'alimentation électrique n'avait aucune influence sur les émissions brutes, la température ou le débit massique des gaz d'échappement.

3.2 Etat chaud

Dans la deuxième étape, l'influence de la densité des alvéoles (variantes de catalyseurs du tableau 2) a été examinée à chaud. Pour cela, les taux de rendement ont été étudiés 100 secondes après le démarrage du moteur jusqu'à la fin du sac 1. La figure 7 montre les taux de rendement HC et la figure 8, les taux de rendement NOx des différents catalyseurs testés.

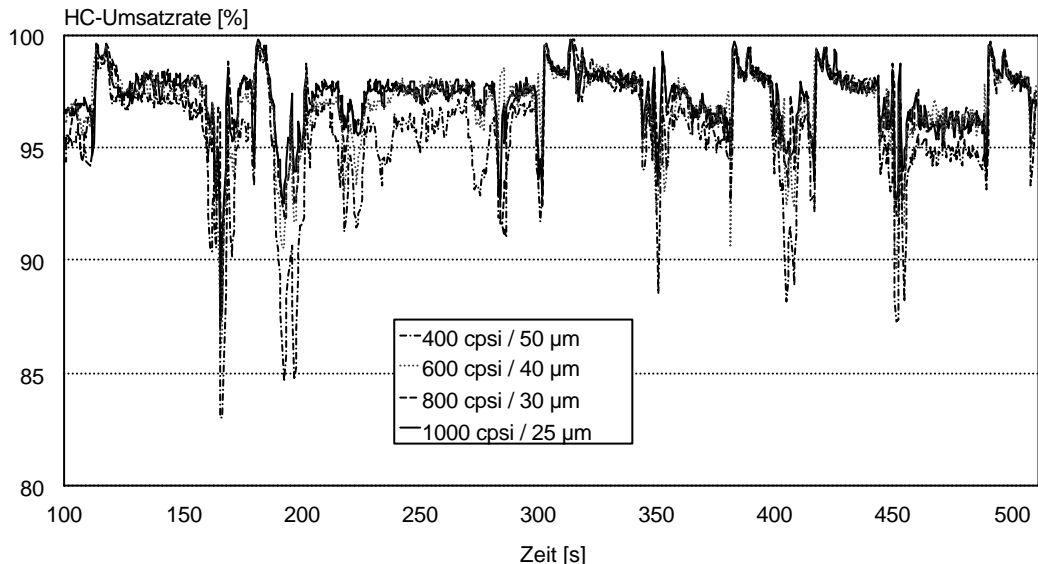


Figure 7 : Taux de rendement HC à chaud des différents catalyseurs testés

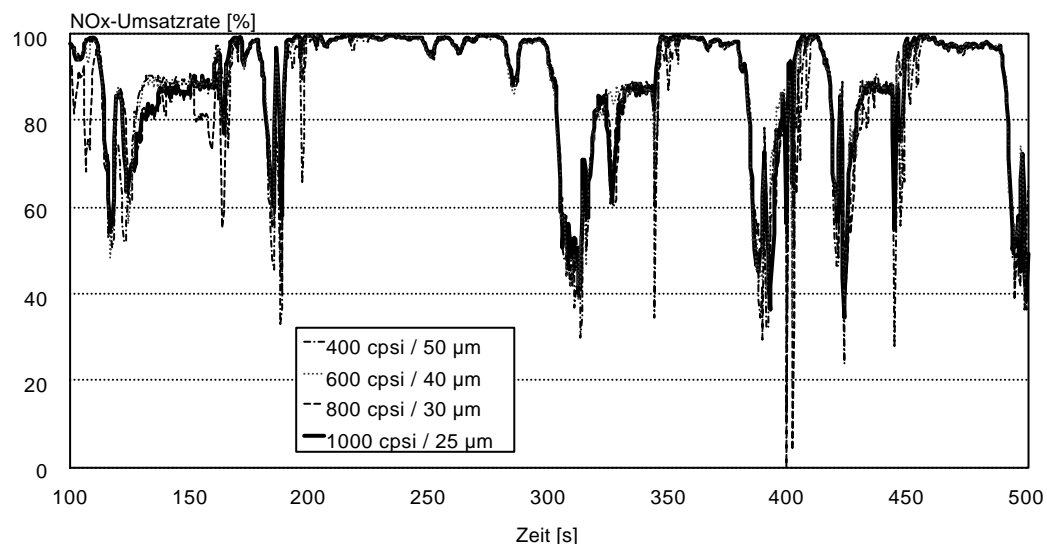


Figure 8 : Taux de rendement NOx à chaud des différents catalyseurs testés

Pour une meilleure représentation, les moyennes respectives des taux de rendement ont été calculées et regroupées dans la figure 9.

L'utilisation d'un catalyseur 1000 cpsi entraîne à chaud une diminution des émissions HC restantes de 35,3 % par rapport au support 400 cpsi. Avec celui à 800 alvéoles, une amélioration de 14,4 % a pu être obtenue. Les émissions brutes finales NOx ont été améliorées du catalyseur standard 400 cpsi à celui à 1000 alvéoles, de 21,7 %.

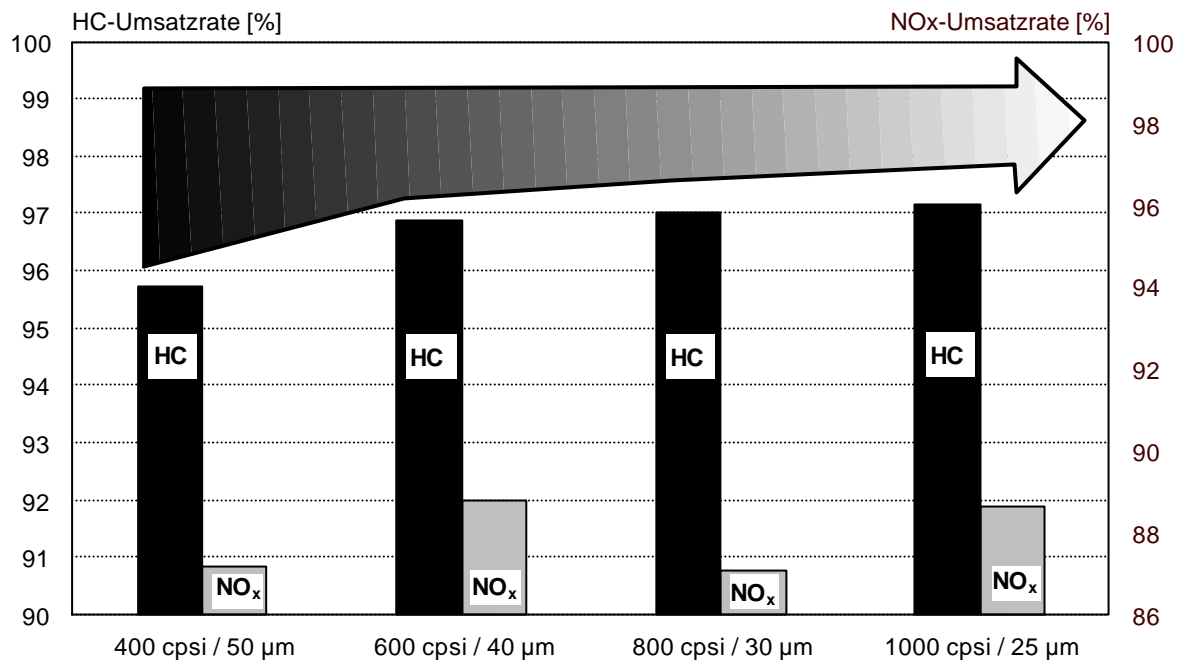


Figure 9 : Moyennes des taux de rendement HC et NOx à chaud

4. Calculs des catalyseurs

Dans un programme de comparaison précédent, il a été montré que l'emploi de petits diamètres de catalyseurs pouvait améliorer le comportement au démarrage à froid [12]. En raison de la perte de pression très élevée avec les petits diamètres, l'emploi de systèmes en cascade représente un compromis efficace. Pour cette raison, des calculs de démarrage à froid ont été faits par la suite avec le meilleur catalyseur 1000 cpsi ; 0,025 mm et le catalyseur chauffé \varnothing 80 x 12 + 50,8 mm, 1000 cpsi / 0,03 mm, afin de calculer le potentiel pour respecter les prescriptions SULEV suivant les émissions brutes. Le temps Light-Off T50 (50 % de conversion atteints) du revêtement catalytique a été pris à 230°C.

Les calculs ont été faits à l'aide du Finite Volumen Programm Katprog développé par Emitec. Les données d'entrée ont été les températures des gaz d'échappement avant catalyseur, le débit massique de gaz d'échappement et les émissions brutes du véhicule A (émissions brutes très basses) et du véhicule B (véhicule européen de série) de la figure 1. Le mélange carburant/air a été fixé = 1 directement après le démarrage du moteur avec Lambda.

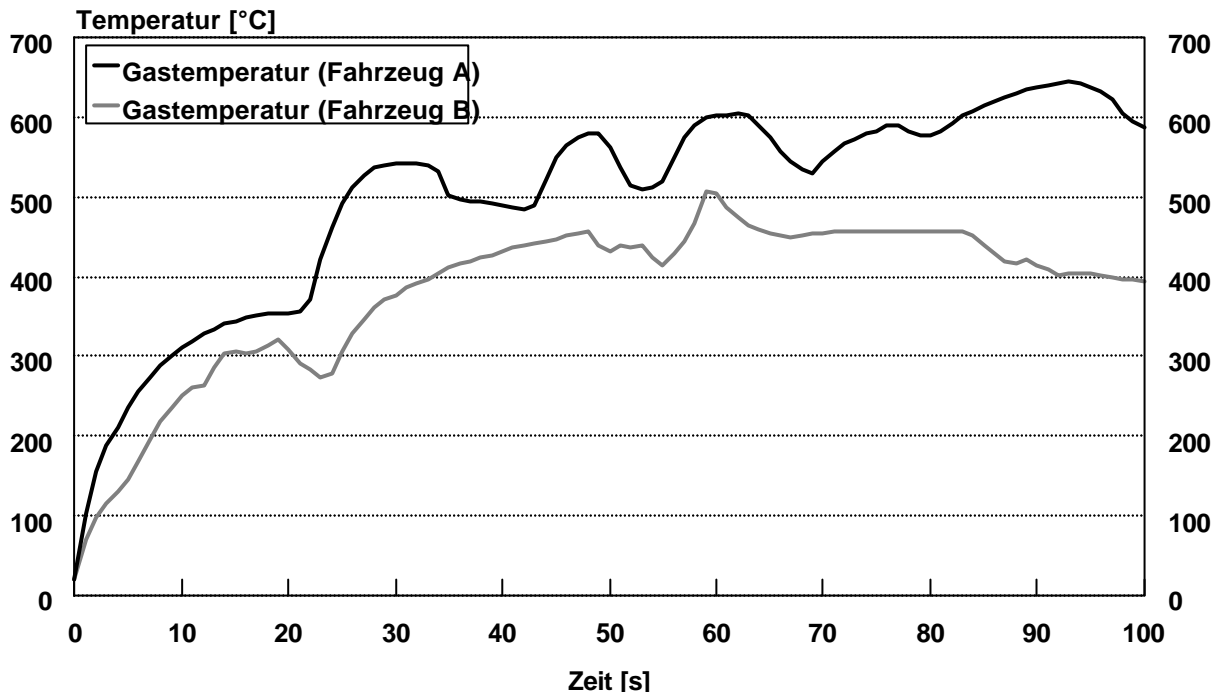


Figure 10 : Température des gaz d'échappement des calculs SULEV

La figure 11 montre les émissions HC cumulées d'une cascade de catalyseurs proche du moteur avec les supports de la taille $\varnothing 80 \times 62,8$ mm et $\varnothing 98,4 \times 120$ mm, 1000 cpsi, 0,025 mm d'épaisseur de feuilles et un système catalytique chauffé dans lequel, le 1^{er} support de la cascade a été remplacé par un cat. E de la taille $\varnothing 80 \times 12 + 50,8$ mm, 400/1000 cpsi, 0,03 mm d'épaisseur de feuilles, 2000 W. Le temps de chauffe était de 20 secondes après le démarrage du moteur.

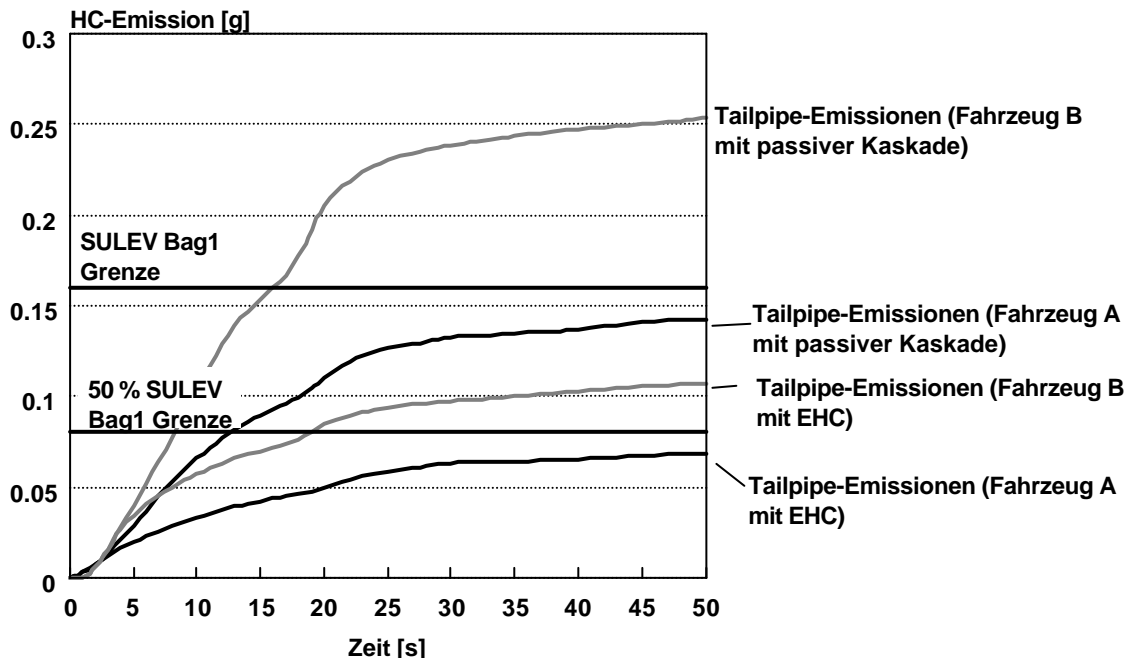


Figure 11 : Emissions tailpipe cumulées d'une cascade de catalyseurs proche du moteur et d'un système cat. E suivant les émissions brutes des véhicules.

Le résultat des calculs montre qu'il est possible avec des émissions brutes basses (véhicule A) d'atteindre à l'état neuf les valeurs SULEV même avec une cascade passive. Pour respecter l'écart de sécurité par rapport à la limite, nécessaire pour le taux de vieillissement connu actuellement (objectif de développement mentionné ci-dessus : 50 % de la limite), l'emploi d'un catalyseur chauffé est cependant nécessaire. Avec des émissions brutes plus élevées (véhicule B), la limite SULEV peut certes être atteinte avec un catalyseur chauffé, cependant l'écart de sécurité prescrit est trop faible.

Par la gestion améliorée du moteur et le taux de vieillissement moindre qui y est lié (en raison des pointes de température absentes en marche instationnaire), l'écart de sécurité prévu par rapport aux limites a pu nettement être réduit. A partir des calculs, il est possible de conclure que par une autre réduction des émissions brutes à 0,8 – 1,0 g/m (valeur de référence pour les émissions de démarrage à froid) des limites SULEV peuvent aussi être atteintes avec des systèmes passifs de traitement complémentaire des gaz d'échappement. D'autre part, on déduit que les limites SULEV avec des émissions brutes supérieures à 2,0 g ne peuvent pratiquement pas être respectées même avec un système catalytique chauffé.

Il est possible d'en déduire que les émissions brutes des moteurs sont à l'avenir un facteur déterminant qui influence la complexité et les coûts du système de traitement complémentaire des gaz d'échappement devant être utilisé.

Pour compenser les émissions brutes élevées, inévitables, une solution possible est un préchauffage bref du catalyseur, éventuellement en liaison avec un faible flux d'air secondaire. Le but de l'air secondaire est de transporter la chaleur du disque chauffant dans le catalyseur suivant, ce qui entraîne selon le temps de préchauffage et l'émission brute, un plus grand volume de catalyseur préchauffé.

Pour que le préchauffage du catalyseur ne représente pas une perte de confort pour le conducteur, il serait possible de préchauffer de manière ciblée par des contacts des portes, des sièges et des ceintures.

5. Résumé

Le développement d'un système SULEV représente des exigences élevées pour le moteur, la commande du moteur et le système de traitement complémentaire des gaz d'échappement. Les observations des taux de rendement nécessaires et des émissions brutes ont montré que pour une émission brute déjà faible de moteur de 1,5 g/m au démarrage à froid, 0,16 g HC maximum pouvaient être dégagés. Selon les différentes émissions brutes, cela donne ainsi des temps Light-OFF (T99,95 %) de 3,5 à 12,5 secondes. Pour concevoir de manière optimale des systèmes catalytiques extrêmement efficaces, des mesures d'émissions ont été réalisées sur des supports catalytiques métalliques avec des densités d'alvéoles de 400 à 1000 cpsi et des épaisseurs de feuilles de 0,05 à 0,025 mm. Cela a entraîné les résultats suivants :

L'augmentation de la densité d'alvéoles de 400 à 1000cpsi avec la diminution simultanée de l'épaisseur des feuilles de 0,05 à 0,025 mm confirme le facteur de pondération du démarrage à froid trouvé plus tôt et entraîne une amélioration des émissions de démarrage à froid de 33,6 %.

A chaud, les émissions restantes ont pu être réduites de 35,3 % par le meilleur transport de masse dans les supports avec des densités d'alvéoles plus élevées.

Les calculs des émissions de démarrage à froid avec des supports catalytiques optimaux révèlent la possibilité d'atteindre les valeurs SULEV suivant l'émission brute avec un système catalytique passif.

Le but de développement, être en dessous des valeurs SULEV à l'état neuf de 50 %, n'a pu être atteint dans les simulations réalisées, qu'avec des émissions brutes très basses, une régulation Lambda optimale et un système de gaz d'échappement actif sur lequel le premier support a été remplacé par un catalyseur chauffé.