

Prédiction simplifiée des émissions de suie à la sortie des chambres de combustion des turbines à gaz opérées à la pression atmosphérique

Simplified prediction of soot emissions in the exhaust of gas turbines operated at atmospheric pressure

Joseph TSOGO*, Detlef KRETSCHMER**

Résumé

Dans des travaux antérieurs [1, 2], il est présenté une corrélation de prédiction des émissions de suie à la sortie des chambres de combustion des turboréacteurs. Pour le développement de cette corrélation, il est fait usage de près de 300 points de mesures expérimentales pour un total de 19 types de carburants brûlés à la pression atmosphérique et à haute pression (0,1 à 0,9 MPa) dans deux échelles (1/2 et 1/3) de la chambre de combustion de type Laval. La précision de la corrélation est jugée très respectable (déviations standard de 40 % par rapport aux données expérimentales) compte tenu de l'imprécision inhérente à la méthode de mesure du chiffre de fumée (SN) elle-même. Ces travaux ont été complétés par des tests réalisés dans la chambre de combustion pleine échelle, et il s'en est suivi une corrélation modifiée et améliorée [3]. Une analyse détaillée des différentes composantes de la corrélation a été entreprise dans la présente étude pour le cas des tests réalisés à la pression atmosphérique. Le résultat est une simplification significative de la corrélation présentée dans [3], sans détérioration majeure de la précision de la prédiction. Ce résultat permet une simplification du modèle explicatif du phénomène de formation et d'oxydation de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz opérées à la pression atmosphérique, de même qu'une limitation de l'analyse du phénomène aux paramètres fonctionnels essentiels. Les turbines à gaz sont généralement utilisées dans les moteurs d'avion, de navires, et dans la production stationnaire d'électricité, de chaleur et de vapeur.

Mots clés

Prédiction. Émission. Suie. Turbine à gaz.

Abstract

In previous works [1, 2], a correlation for the prediction of soot in gas turbine exhaust has been presented. The development of the correlation is based on 300 of experimental data for a total of 19 fuels burned both at atmospheric and high pressure (0.1 to 0.9 MPa) and two scales (1/2 and 1/3) of a Laval type combustion chamber. With the wide range of fuels burned in the experiment giving a smoke number variation from 0 to 100, the accuracy of the correlation (Standard Deviation of 40%) is acceptable for most purposes. Later on the correlation has been improved using data from the full scaled combustion chamber as shown in [3]. A detailed analysis of the correlation is undertaken within the present work for the case of the experiments at atmospheric pressure. The result is a simplification of the correlation presented in [3] without a major deterioration of the standard deviation. This result leads to a simplification of the previous proposed soot formation and oxidation model within gas turbine combustors (operated at atmospheric pressure) and limitates the analysis of the phenomenon on essential functional parameters as well. Gas turbines are generally used in aircrafts, ships, and in stationary production of electricity, heat and vapor.

Keywords

Prediction. Emission. Soot. Gas turbine.

* Professeur – Collège de la garde côtière du Canada – Département de génie maritime – CP 4500 – Sydney – NS, B1P 6L1 Canada – E-mail : jtsogo@yahoo.fr

** Professeur – Université Laval – Département de génie mécanique – Québec – G1K 7P4 Canada.

Nomenclature

C	Concentration de la suie mg/L
e	Fonction exponentielle
h	Teneur massique en hydrogène du combustible
M_a	Nombre de Mach moyen
P	Pression d'entrée de la chambre de combustion – MPa
P_a	Pression atmosphérique – MPa
SN	Chiffre de fumée
T_d	Température de la zone secondaire ou de destruction – K
T_f	Température de la zone primaire ou de formation – K

V	Volume de la chambre de combustion
Φ	Rapport d'équivalence (définissant la richesse)
τ_{pz}	Temps de résidence dans la zone primaire – s
τ_{sz}	Temps de résidence dans la zone secondaire – s

Indices

pz	Zone primaire
sz	Zone secondaire
d	Phénomène d'oxydation ou de destruction de la suie
f	Phénomène de formation de la suie

1. Introduction

La prédiction des émissions de suie à la sortie des chambres de combustion des turboréacteurs est un champ d'intérêt d'importance pour les constructeurs, compte tenu du caractère destructeur des dépôts de suie sur les parois des chambres de combustion. Les dépôts de suie sont effectivement très conducteurs de chaleur contribuant ainsi à l'accélération de la fatigue des parois. Par ailleurs, les exigences environnementales au sujet de ces émissions sont de plus en plus contraignantes, les réglementations en vigueur dans plusieurs pays nivelant les taux d'émission à des niveaux de plus en plus bas dépendamment des foyers de combustion. La suie, essentiellement constituée de carbone est un produit d'une combustion incomplète des combustibles dans divers foyers de combustion. Cependant, prédire les émissions de suie reste une tâche très compliquée pour l'ingénieur. La généralisation des recettes pose ici un sérieux problème d'un foyer de combustion à l'autre. La SAE (*Society of Automotive Engineers*) a néanmoins mis au point une méthode de mesure du chiffre de fumée (SN) permettant de déterminer les émissions de suie à la sortie des turboréacteurs [4]. Cette méthode, bien que loin d'être parfaite, reste actuellement la référence dans l'industrie spécialisée au point où elle a permis l'accumulation d'un grand nombre de données expérimentales.

Plusieurs auteurs ont développé des corrélations de prédiction de la suie, les unes plus ou moins pratiques que les autres. Une analyse d'un grand nombre de ces corrélations est compilée dans [1] où l'auteur présente par ailleurs une corrélation applicable à des tests réalisés aussi bien à la pression atmosphérique qu'aux pressions plus élevées (0,1 à 0,9 MPa) pour deux échelles (1/2 et 1/3) de la chambre de combustion.

La précision de la corrélation ramenée à une prédiction du chiffre de fumée (SN) pour une meilleure comparaison avec les valeurs mesurées de SN, est jugée très respectable (déviation standard de 40 %). Ce résultat est confirmé dans [3] où le champ d'application de la corrélation est d'ailleurs élargi à la pleine échelle de la chambre de combustion dont les données de test de combustion étaient désormais disponibles. Partant de cette base, une analyse quantifiée de la corrélation présentée dans [3] montre que cette dernière peut être simplifiée et donner de tout aussi bons résultats en ce qui concerne les tests réalisés à la pression atmosphérique.

2. Principe de fonctionnement d'une chambre de combustion de turbine à gaz

La chambre de combustion d'un turboréacteur se situe entre le compresseur (à l'entrée) et la turbine

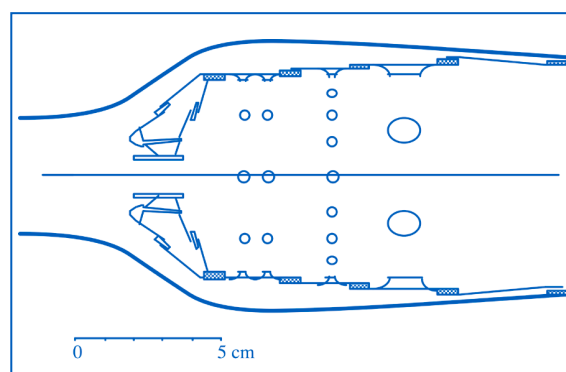


Figure 1.
Schéma de la chambre « 1/3 Laval ».
Scheme of the combustion chamber "1/3 Laval".

(à la sortie). À l'entrée du tube à flamme, on retrouve le système d'injection de carburant et le « Swirl » qui imprime un mouvement tourbillonnaire au carburant après son injection dans la chambre. L'air de combustion issu du compresseur pénètre dans la chambre à travers les deux premières rangées de trous situées sur la paroi du tube à flamme. La forme des trous impose à l'air un mouvement circulaire permettant ainsi un mélange optimisé de l'air et du carburant dans la zone de combustion avant l'allumage. La troisième rangée de trous située dans la zone secondaire du tube à flamme laisse pénétrer une quantité d'air favorisant la finalisation de la combustion démarrée dans la zone de combustion. La dernière rangée de trous située avant la sortie de la chambre laisse pénétrer une quantité d'air utile à la dilution et au refroidissement des fumées de combustion.

3. Analyse de la corrélation

La corrélation présentée dans [3] est une version corrigée et améliorée de celle présentée dans [1, 2], du fait qu'elle intègre des paramètres supplémentaires, le nombre de Mach et le volume de la chambre en l'occurrence. De plus, le champ d'application de la corrélation est élargi à la pleine échelle de la chambre de combustion alors qu'elle était limitée aux échelles 1/2 et 1/3 au départ. La corrélation présentée dans [3] par les auteurs est développée à partir d'un modèle concevant la chambre de combustion comme une cascade de trois réacteurs (zone primaire, zone secondaire et zone de dilution) branchés en série : dans les deux premiers réacteurs, les deux phénomènes de formation et d'oxydation de la suie se déroulent simultanément, aucun phénomène de réaction n'ayant plus lieu dans le troisième réacteur.

Le schéma du modèle se présente en conséquence comme ci-dessous, la zone primaire allant de l'entrée du tube à flamme jusqu'à la fin de la deuxième rangée de trous, tandis que la zone secondaire se situe entre la deuxième rangée de trous et le début de la quatrième rangée de trous qui représente également le début de la zone de dilution.

Zone primaire	Zone secondaire	Zone de dilution
Formation et oxydation de la suie	Formation et oxydation de la suie	Aucune réaction chimique

Figure 2.

Représentation schématique du modèle de formation et d'oxydation de la suie dans une chambre de combustion de turbine à gaz.

Simplified view of the soot formation and oxydation model in a gas turbine combustion chamber.

Le développement mathématique du modèle, après une réécriture des constantes définies dans [2] et l'introduction empirique du volume de la chambre

et du nombre de Mach conduit à la corrélation suivante, qui permet de déterminer la concentration de la suie à la sortie de la chambre de combustion :

$$C_{sz} = 12,22863 V^{-0,188154} Ma^{0,6} \frac{(1 + 3,4h)^{-12,7}}{(1 - \Phi)^{1,5}} \left(\frac{P}{Pa} \right)^{-0,75} \times e \left(\frac{11\,000}{T_d} - \frac{11\,000}{T_f} \right) \times \left\{ 1 - e \left[-10^5 (\tau_{pz} + \tau_{sz}) \right] \times \left(\frac{P}{Pa} \right)^{0,5} e^{-11\,000/T_d} \right\} \quad (1)$$

Le calcul du terme

$$\left\{ 1 - e \left[-10^5 (\tau_{pz} + \tau_{sz}) \right] \times \left(\frac{P}{Pa} \right)^{0,5} e^{-11\,000/T_d} \right\}$$

de la relation (1) pour les données de combustion des tests réalisés à la pression atmosphérique et à haute pression dans les chambres de combustion concernées, montre qu'il est très sensiblement égal à 1 du fait que les valeurs des termes

$$e \left[-10^5 (\tau_{pz} + \tau_{sz}) \right] \text{ et } e^{-11\,000/T_d}$$

sont très voisines de zéro. La relation (1) peut en conséquence être réduite à l'expression suivante :

$$C_{sz} = 12,22863 V^{-0,188154} Ma^{0,6} \frac{(1 + 3,4 h)^{-12,7}}{(1 - \Phi)^{1,5}} \left(\frac{P}{Pa} \right)^{-0,75} \times e \left(\frac{11\,000}{T_d} - \frac{11\,000}{T_f} \right) \quad (2)$$

où les paramètres influençant la production de la suie dans le système se limitent au volume de la chambre, au nombre de Mach, à la teneur massique en hydrogène du combustible, au rapport d'équivalence et aux températures des zones primaire et secondaire.

4. Validation

Pour la prédiction du chiffre de fumée (SN), la relation (2) est posée équivalente à la relation développée par Odgers et Magnan [5] qui relie la concentration de la suie au chiffre de fumée tel que :

$$C_{sz} = \frac{0,177 SN}{(100 - SN)^{0,472}} \quad (3)$$

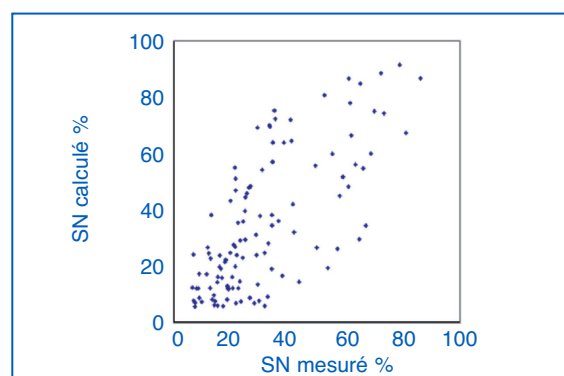


Figure 3.

Mise en rapport des valeurs de SN calculées selon (3) et des valeurs de SN mesurées.

Comparison of calculated SN values according to (3) and measured SN values.

Les valeurs de SN calculées comme ci-dessus ont été mises en rapport avec les valeurs de SN mesurées lors des tests de combustion à la pression atmosphérique de 19 carburants (allant des mélanges paraffiniques jusqu'au composé aromatique pur) dans la chambre 1/2 Laval. Cette mise en rapport est représentée sur la Figure 3.

L'erreur relative moyenne entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées est de 16 % pour un total de 111 points de mesure, ce qui est tout à fait respectable lorsqu'on tient compte des erreurs inhérentes aux techniques de mesure du SN qui peuvent atteindre 30 % selon [3].

5. Commentaires

Ce résultat donne lieu à quelques réflexions au sujet de l'influence réelle sur la production de la suie de certains paramètres opérationnels de la chambre de combustion utilisés dans le développement de la relation (1). Ces paramètres sont :

- le temps de résidence de la zone secondaire ;
- la température de destruction de la suie.

En effet, concernant les tests réalisés à la pression atmosphérique se retrouvant au centre de la présente analyse, le terme apprécié sensiblement égal à 1 plus haut contient (entre autres) comme paramètres les temps de résidence des zones primaire et secondaire de même que la température de destruction de la suie. Si ce terme est sensiblement égal à 1, cela revient à dire que la valeur de

$$\left\{ 1 - e \left[-10^5 (\tau_{pz} + \tau_{sz}) \right] \times \left(\frac{P}{P_a} \right)^{0,5} e^{-11\,000/\tau_d} \right\}$$

est très voisine de zéro comme signifié plus haut. Ceci suppose en conséquence que l'influence explicite de la combinaison « température de destruction-temps de résidence », sans être nulle est tout au moins négligeable. Le temps de résidence ne figurant (de manière explicite) pas du tout comme paramètre dans la relation (2), on est enclin à penser que son influence dans le phénomène de production de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz est effectivement négligeable, tandis que l'influence de la température de destruction, qui elle figure dans la relation (2), peut être considérée comme marginale. Le phénomène de production de la suie reste ici fortement influencé par les paramètres de construction de la chambre (volume de la chambre et nombre de Mach), la nature du combustible (à travers sa teneur en hydrogène), la qualité du mélange combustible (à travers le rapport d'équivalence) et la température de formation. Le caractère sinon nul tout au moins négligeable de l'influence du temps de résidence sur la production de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz se confirme d'ailleurs lorsqu'on teste la sensibilité de la quantité de suie produite par rapport au temps de résidence (aussi bien celui de la zone primaire que celui de la zone secondaire) au cours des mêmes opérations de

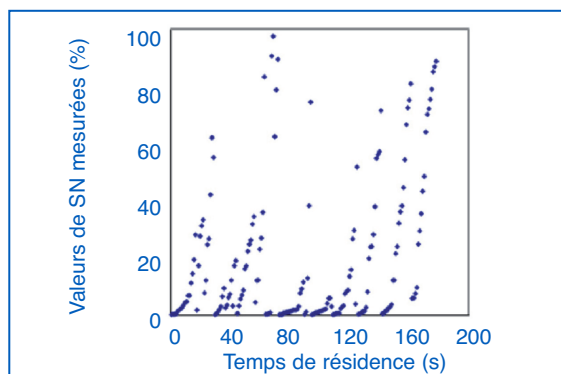


Figure 4.

Mise en rapport des valeurs de SN et du temps de résidence.

SN values according to residence time.

combustion : on ne décèle ici aucun lien particulier entre les deux, comme le montre la figure suivante où les valeurs de SN enregistrées lors des tests réalisés à la pression atmosphérique sont mises en rapport avec le temps de résidence de la zone secondaire (l'allure est la même s'agissant du temps de résidence de la zone primaire).

De façon évidente, la température de formation influence beaucoup plus la production de la suie comparativement au temps de résidence des particules dans la chambre de combustion. La température de destruction joue également sûrement un rôle dans le processus de production de la suie, seulement ce rôle semble secondaire, celui de la température de formation étant plus déterminant. La zone primaire s'avère ainsi être la zone privilégiée d'investigation en ce qui concerne le phénomène de production de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz, la production de la suie dans la zone secondaire restant un phénomène marginal pour ce qui est de son apport net dans le phénomène global.

L'analyse du mécanisme de production de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz pourrait ainsi sans grand risque d'erreur significative, être réduite à la recherche d'une meilleure compréhension des phénomènes ayant cours dans la zone primaire, car ce sont ces derniers qui sont effectivement les plus déterminants en rapport avec la production globale de la suie détectable à la sortie des chambres de combustion des turbines à gaz.

6. Conclusion

Dans cette étude, il est présenté une corrélation simplifiée mais pratique du phénomène de formation et de destruction de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz. Cette corrélation issue d'une analyse détaillée d'une corrélation antérieure, présente la particularité de traiter d'un phénomène complexe à partir d'une relation facile à manipuler. Cette approche a pour conséquence de réduire à l'essentiel le nombre de paramètres ayant une incidence réelle sur la production des émissions de suie

à la sortie des chambres de combustion des turbines à gaz : il s'agit surtout des paramètres opérationnels de la zone primaire. L'approche permet par ailleurs d'apprécier la contribution des différentes zones de la chambre au phénomène de production de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz. Il s'avère que la contribution de la zone primaire est déterminante en rapport avec la production globale de la suie, tandis que la contribution de la zone secondaire bien qu'existante semble marginale. Les efforts en termes de réduction des émissions de suie à la sortie des chambres de combustion des turbines à gaz devraient en conséquence être concentrés sur les phénomènes ayant cours dans la zone primaire et

les paramètres contrôlant ces phénomènes, l'apport de la zone secondaire pouvant être considéré comme négligeable sur le plan pratique. Cependant, le champ d'application de la nouvelle corrélation est pour le moment limité aux tests de combustion réalisés à la pression atmosphérique dans la chambre de combustion de type Laval. Il serait naturellement intéressant d'essayer d'élargir le champ d'application de la corrélation aux données en provenance d'autres sources (d'autres chambres de combustion). Ce qui viendrait généraliser l'analyse présentée ici au niveau de la conception des chambres de combustion des turbines à gaz. La recherche de données de cette nature est en cours.

Références

1. Tsogo J. Formation et oxydation de la suie dans les chambres de combustion des turbines à gaz. Thèse de Ph.D., Université Laval, 1994.
2. De Champlain A, Tsogo J, Kretschmer D. Smoke Number Prediction in Gas Turbine Exhaust. American Society of Mechanical Engineers, 93-GT-168, 1993.
3. De Champlain A, Kretschmer D, Tsogo J, Pearce GF. Prediction of Soot Emissions in Gas-Turbine Combustors. *Journal of Propulsion and Power* 1997 ; 13 (1) : 117-22.
4. SAE Committee E-31. Aircraft Gas Turbine Smoke Measurement. SAE Aerospace Recommended Practice, 1179 Rev. B, 1993.
5. Odgers J, Magnan ER. Notes on Occurrence and Determination of Carbon Within Gas Turbine Combustors. American Society of Mechanical Engineers, 88-GT-164, 1988.

