JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE STATISTIQUE

DIDIER JEANNEL
IGOR MONTAGNIER

Optimisation des intervalles inter-inspections de turboréacteurs civils

Journal de la société française de statistique, tome 141, n° 3 (2000), p. 61-68

<http://www.numdam.org/item?id=JSFS_2000__141_3_61_0>

© Société française de statistique, 2000, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société française de statistique » (http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM
Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

OPTIMISATION DES INTERVALLES INTER-INSPECTIONS DE TURBORÉACTEURS CIVILS

Didier JEANNEL [1], Igor MONTAGNIER [2]

RÉSUMÉ

Les coûts de maintenance des turbopropulseurs aéronautiques sont principalement liés à la restauration des performances moteur, caractérisées en particulier par la valeur de la température en sortie de turbine du turboréacteur. Les moteurs sont qualifiés pour une température limite en sortie de turbine L'écart entre celle-ci et la température de fonctionnement est appelé marge EGT [3]. Lorsqu'un moteur atteint cette température limite, il est déposé en atelier pour y subir une restauration de ses performances. La modélisation de l'EGT obtenue à partir de paramètres influents déterminés par jugements d'experts et procédures statistiques, permet d'optimiser les déposes des moteurs d'une même famille. Cette possibilité se révèle être très efficace pour séduire les avionneurs en réduisant de façon significative les coûts de maintenance qui leur reviennent

ABSTRACT

The aircraft engine market is subjected to an increasingly severe competition. The engines manufacturers have to provide guaranties on the correct operation of future engines. Among these guaranties maintenance costs appear. They represent approximately fifteen percents of the ownership cost of an engine. Moreover, they must be determined before design phase Maintenance costs for engines in aeronautics depend mainly on degradation of performances. This degradation phenomenon is an observable slow process in time. The performance lost is due to the wear of parts like HPT blades. It can be quantified by the observation of the Exhaust Gas Temperature (EGT). The degradation phenomenon is an observable slow process in time. The performance lost is due to the wear of parts like HPT blades. It can be quantified by the observation of the Exhaust Gas Temperature (EGT) which is directly linked to the efficiency of the engine. The first step consists in identifying influent parameters with the assistance of experts These parameters can be of two types : technical (conception, use of the engine) or economical Statistical methodologies select influent parameters and model temperature degradation. The obtained model allows to estimate with few parameters the degradation of a future engine, and to optimise shop visit time.

1. Service Sûreté de Fonctionnement, Snecma Moteurs, 77550 Moissy-Cramayel, France; e-mail . didier jeannel@snecma.fr

2. Pôle Sûreté de Fonctionnement, RETEC, 16 boulevard Chamblain, 77000 Melun, France, e-mail . soc2.sdf@retec.fr

3. Exhaust Gas Temperature · température mesurée dans la turbine.

1. INTRODUCTION

Le marché aéronautique civil est soumis à une concurrence de plus en plus sévère. Sur les vingt prochaines années, il devrait plus que doubler et est estimé à plus de 2000 milliards d'euros.

Les constructeurs de moteurs d'avion sont contraints à fournir des garanties de bon fonctionnement du moteur avant même la conception d'un nouveau turboréacteur. Les coûts de maintenance font partie de ces garanties, au même titre que la fiabilité, la sécurité ou la disponibilité. Ils doivent être déterminés dès les premiers appels d'offre.

Ces coûts dépendent principalement du prix des pièces et de la fréquence des visites en atelier. Dans les turboréacteurs de Snecma Moteurs ce dernier élément est lié à l'évolution au cours des vols de la température de sortie de turbine (EGT = Exhaust Gas Turbine).

Cette étude a donc pour objet de modéliser l'EGT en fonction de paramètres caractéristiques des turboréacteurs qui sont disponibles lors de la réponse à appel d'offres.

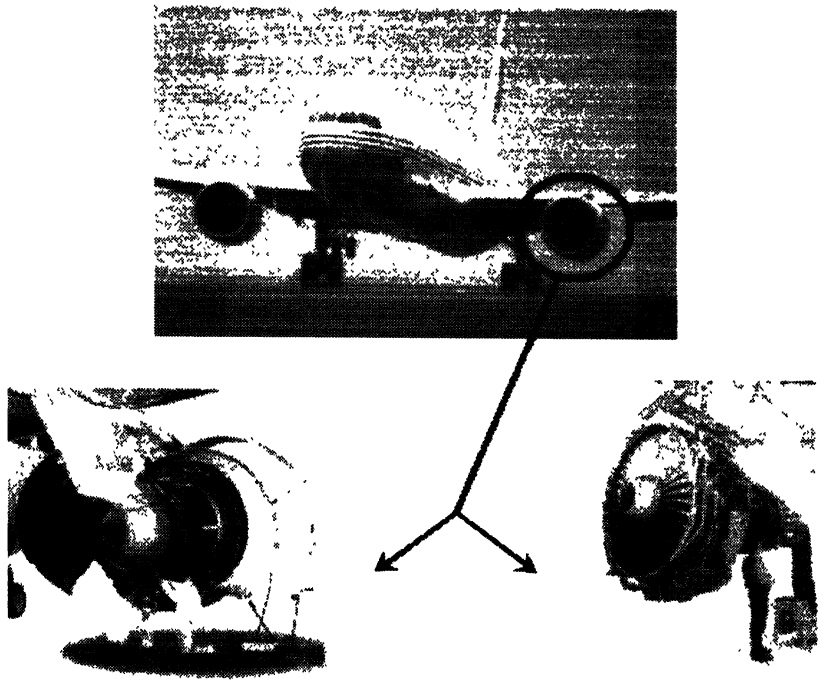
2. PROBLÈME POSÉ

2.1 Contexte opérationnel

La maintenance de moteurs en aéronautique se décompose principalement en deux types (cf. Figure 1). D'une part, une maintenance qui consiste en une inspection du moteur au sol avant chaque vol (dite *inspection sous l'aile*). Cette inspection systématique consiste à observer certaines parties du moteur sans l'ôter de l'avion, et en soulevant uniquement les carters du moteur. D'autre part, une maintenance beaucoup plus conséquente en terme d'indisponibilité est effectuée sur les moteurs. Cette *maintenance préventive conditionnelle* consiste à déposer le moteur en atelier afin de remplacer les pièces endommagées de ses modules[4]. Cette maintenance s'opère sur un moteur que quelques fois au cours de sa vie. Cette opération coûteuse engendre une indisponibilité importante et nécessite le remplacement de nombreuses pièces moteur très onéreuses.

Les coûts de maintenance en aéronautique dépendent donc principalement du *prix des pièces* et de la *fréquence des visites en atelier*, ce dernier élément est lié à la température de sortie de turbine appelée EGT. Pour une compagnie aérienne qui achète les services des avionneurs, il est intéressant de connaître la fréquence des déposes moteurs en atelier, afin de planifier les opérations de maintenance à appliquer. En particulier, la connaissance de l'instant de la première dépose est une donnée importante et souhaitable à détenir. La modélisation du comportement de la variable EGT en fonction du nombre

4. Un module est une partie du moteur (compresseurs, turbine, etc). L'assemblage de tous les modules constitue le moteur



(a) (b)

FIG 1. — Deux types de maintenance d'un turboréacteur : sous l'aile (a), en atelier (b).

de cycles [5] moteur permet de prédire cet instant de dépose pour un type de moteur donné.

2.2 Le modèle EGT

La différence entre le seuil de température acceptable et la température observée dans la turbine est appelée *marge EGT*. Son évolution est mesurée en fonctionnement. En début de vie, cette marge de température est élevée, puis elle diminue progressivement avec le nombre de cycles.

La dégradation de la marge EGT est la cause principale des déposes moteurs. Elle correspond à une perte de rendement de certains modules, et par conséquent du moteur. Cette perte se traduit en particulier par l'usure de pièces mécaniques. Elle se caractérise principalement par la variation de paramètres moteurs qui sont enregistrés à l'aide de capteurs situés dans le réacteur au cours de chaque cycle moteur (augmentation de températures, de durées, etc.). L'indicateur EGT permet de suivre la vitesse de dégradation des performances moteur et d'anticiper l'instant de retour en atelier quand l'EGT converge vers le seuil limite acceptable de température (cf. Figure 2).

5. Un cycle moteur correspond à la période comprise entre le décollage et l'atterrissage de l'avion (elle comprend cinq phases décollage, montée, croisière, descente, atterrissage)

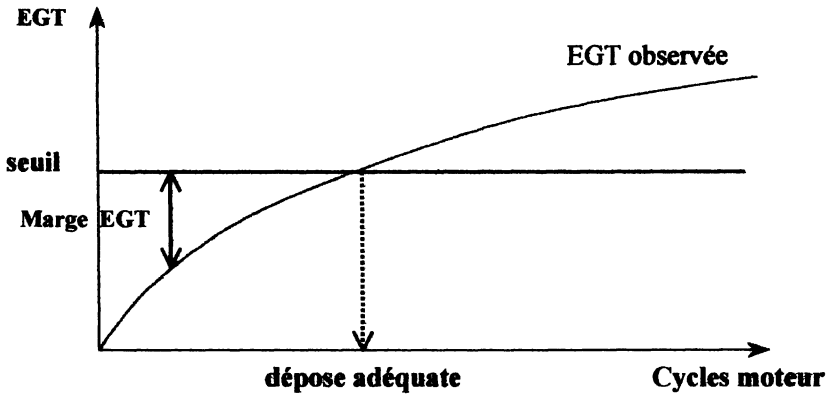


FIG 2. — Représentation graphique de l'EGT.

L'expérience des experts conduit à modéliser la température de la turbine d'un moteur civil de la façon suivante :

$$EGT = K \cdot n^Y \tag{1}$$

K et Y représentent des constantes spécifiques à chaque type de moteur qui sont à déterminer, et n le nombre de cycles moteur. Elles dépendent de deux familles de paramètres spécifiés par jugements d'experts qui sont :

– des paramètres thermocycles (températures, durées) ;

– des paramètres missions de l'avion (court, moyen ou long courrier).

Pour les moteurs en exploitation, ces constantes sont connues, mais inconnues pour les moteurs en phase de développement. La démarche consiste donc à estimer ces constantes à partir de données issues de flottes de moteurs en exploitation pour permettre l'estimation de la valeur de l'EGT pour un type de moteur donné. Les estimations de K et Y reposent sur une modélisation fournie par les experts, puis par une sélection des paramètres influents effectuée par procédures statistiques. L'analyse menée servira de référence pour la modélisation de l'EGT des futurs moteurs civils.

3. Méthodologie

3.1 Démarche

La démarche adoptée pour parvenir à la modélisation de l'EGT se scinde en deux approches. La première, que l'on nomme *modélisation emboîtée* est l'approche naturelle qui consiste à estimer les constantes K et Y, et donc l'EGT. La seconde consiste à estimer l'EGT en prenant en considération l'aspect temporel et à réduire l'erreur du modèle, en utilisant une modélisation par données de panel.

3.2 Modélisation dite «emboîtée»

Les constantes K et Y sont fonction des variables endogènes [6] $P = (P_1, P_2, \ldots, P_m)$ qui sont des données moteur (données thermiques, de durées liées au type de mission, à la poussée [7], etc.). Elles sont estimées par un modèle multiplicatif de la forme :

$$K = P_1^{a_1} \cdot P_2^{a_2} \ldots P_m^{a_m} \tag{2}$$

$$Y = P_1^{b_1} \cdot P_2^{b_2} \ldots P_m^{b_m} \tag{3}$$

Le choix d'une structure multiplicative proposé au modèle par les experts repose sur l'interprétation des coefficients a_i et b_j. Ces coefficients représentent l'élasticité de K ou de Y par rapport aux paramètres considérés. Une façon simple d'interpréter l'élasticité est de la considérer comme le taux de variation de K ou de Y suivant une variation de 1 % d'un paramètre moteur P. La théorie statistique étant bien développée pour l'étude des modèles linéaires, il est intéressant de se ramener au cadre du modèle linéaire. Une transformation (logarithme népérien) permet de se retrouver dans ce contexte bien connu et autorise l'utilisation de tous les concepts associés aux modèles linéaires (estimation, tests...)

$$\ln(K) = a_1 \ln(P_1) + a_2 \ln(P_2) + \ldots + a_m \ln(P_m) \tag{4}$$

$$\ln(Y) = b_1 \ln(P_1) + b_2 \ln(P_2) + \ldots + b_m \ln(P_m) \tag{5}$$

La méthode statistique d'estimation des paramètres d'un modèle linéaire la plus usitée est celle des moindres carrés ordinaires (MCO). L'utilisation de cette méthode impose au préalable la vérification des hypothèses qui autorise son utilisation. En particulier, l'indépendance des variables explicatives P, qui se traduit par l'absence de multicolinéarité entre variables, doit être prouvée. Il s'avère que dans de bien nombreuses situations, l'utilisation de ce type de modèles s'effectue sans que cette condition soit vérifiée (sinon violation des hypothèses d'utilisation des MCO). Néanmoins, les résultats obtenus sont bien souvent suffisants et satisfaisants, même si la présence de multicolinéarités entre les variables endogènes engendre un biais d'estimation.

Pour pallier ce problème de multicolinéarité entre variables, une procédure de sélection des variables de type *Forward Selection* a été utilisée pour ne conserver que les variables les plus influentes dans l'explication de K et Y. Parallèlement à ce choix statistique des variables influentes, l'avis des experts permet de confronter les résultats obtenus à leurs attentes et de confirmer le choix des variables à prendre en compte dans le modèle.

L'estimation des coefficients a_i et b_j de chaque modèle permet ainsi d'obtenir une estimation des constantes K et Y par type de moteur, et donc de l'EGT. Deux modèles sont donc nécessaires à l'estimation de la température de sortie de turbine : d'où la terminologie de *modèles emboîtés*.

---

6. Variable endogène · on dit aussi variable explicative.

7. Poussée · force propulsive d'un moteur à réaction (s'exprime généralement en Livre ou en Newton)

3.3 Modélisation par données de panel

Le but de cette méthode est de réaliser une estimation de l'EGT d'un moteur en une seule étape. L'estimation simultanée de K et Y dans l'approche précédente engendre en effet une accumulation d'erreurs et donc un biais d'estimation de l'EGT. L'approche considérée ici prend comme modèle de départ le modèle transformé (en logarithme népérien) suivant :

$$\ln(EGT) = \ln(K) + Y \cdot \ln(n) \tag{6}$$

Une analyse sur les valeurs de K et Y des moteurs en exploitation indique la présence d'une relation linéaire. Y étant plus déterminant dans la forme de l'EGT, il sera estimé par combinaison linéaire des paramètres influents. En ce qui concerne K, il sera considéré comme une constante dans le modèle transformé. Ceci évite d'ajouter un biais supplémentaire dans l'estimation de l'EGT. Le modèle devient ainsi :

$$\ln(EGT) = Cste + c_1 \cdot P_1 \cdot \ln(n) + c_2 \cdot P_2 \cdot \ln(n) + \ldots + c_m \cdot P_m \cdot \ln(n) \tag{7}$$

En notant $P^*_{i,n}$ le produit de P_i par le logarithme du nombre de cycles n, on crée des variables qui évoluent dans le temps :

$$\ln(EGT)_{\text{moteur } j} = Cste + c_1 P^*_{1,j,n} + c_2 P_{2,j,n} + \ldots + c_m P^*_{m,j,n} \tag{8}$$

L'intérêt de ce changement de variable est d'avoir pour différents cycles moteur, plusieurs valeurs d'EGT et de paramètres moteur. Ces différents cycles définissent des instants importants dans la vie d'un moteur en terme de dégradation de ses performances, et sont fixés par les experts. Cela fournit pour un type de moteur spécifique, plusieurs valeurs EGT. On crée ainsi artificiellement, pour un même moteur, l'évolution de son EGT et de ses paramètres influents en fonction du nombre de cycles. L'utilisation de modèles de données de panel est bien adapté dans ce cas (cf. Figure 3).

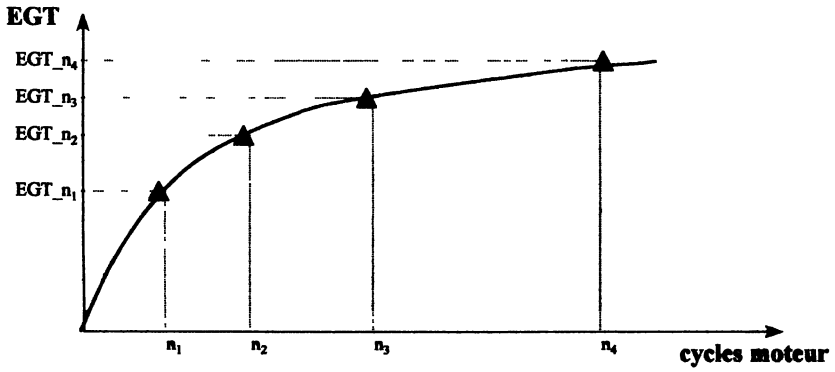


FIG 3. — Constitution d'un échantillon de données de panel.

Cette démarche entraîne une meilleure estimation de la dégradation de l'EGT puisque plusieurs mesures sont enregistrées lors des cycles (cf. Figure 3). La base de données est par conséquent élargie.

4. RÉSULTATS

Les deux approches ont été confrontées sur l'ensemble des moteurs civils de Snecma Moteurs. A chaque fois, la modélisation par données de panel de l'EGT est mieux adaptée à celle par modèles emboîtés. Le graphique suivant illustre cette idée. Sur cette figure, la date de dépose du moteur est surestimée de 23 % par rapport à l'instant de dépose optimal avec la modélisation emboîtée.

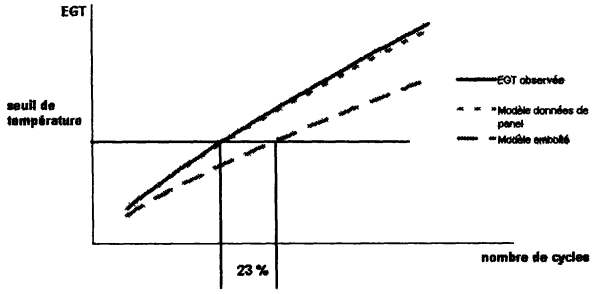


FIG 4. — Comparaison des deux modèles.

Le modèle nécessite la connaissance de quelques paramètres judicieusement choisis par les experts et les procédures statistiques. Il est utilisé par le motoriste pour fournir une réponse formelle à l'avionneur sur le comportement du futur moteur.

5. CONCLUSION

La collaboration entre les ingénieurs des bureaux d'études, des intégrateurs et des statisticiens a permis l'élaboration d'un modèle mathématique de dégradation de la température de sortie de turbine d'un turboréacteur civil. La complémentarité des compétences propres à chaque secteur était indispensable pour aboutir au modèle final. En particulier, l'interprétation physique des modèles statistiques nécessitait à la fois la connaissance du système et celle des outils statistiques.

La confrontation des résultats fournis par le modèle retenu à l'expérience est satisfaisante. Le modèle est une aide à la décision non négligeable. Il permet de prédire en phase avant projet et à partir de quelques caractéristiques moteurs connues, l'évolution de l'EGT en fonction du nombre de vols. Il autorise la prévision des déposes d'une flotte comprenant des avions d'une même famille et utilisant des moteurs au même standard, mais capables de différentes poussées en fonction d'un simple réglage. Il améliore ainsi la gestion d'une flotte de moteurs qui devient aujourd'hui de plus en plus complexe pour une compagnie aérienne.

En utilisant le modèle EGT, les compagnies peuvent utiliser pleinement le potentiel des moteurs en les montant d'abord sur les plus gros avions, puis sur les plus petits en exploitant au maximum la marge EGT. La vie sous l'aile [8] du moteur est ainsi prolongée, les visites en atelier sont mieux planifiées.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec l'aide de J.P. Poitevin, J.R. Massé, P. Wurniesky, P. Morel, M.C. Dubois, J.C. Taillant de Snecma Moteurs et F. Comenge Segard de Snecma Services.

7. RÉFÉRENCES

[1] SAPORTA Gilbert, *Probabilités, analyse des données et statistique*, Technip, 1990.

[2] DORMONT Brigitte, *Introduction à l'économétrie des données de panel*, Editions du CNRS, 1989.

[3] AIR & COSMOS, *Les enjeux de la maintenance*, N° 1774, 8 décembre 2000.

[4] SNECMA INFORMATIONS, *Optimiser les déposes*, N° 348, novembre 1999.

[5] PSAM5 Conférence, *Modelling the degradation of airframe engine temperature within the framework of maintenance costs*, décembre 2000.

8. Vie sous l'aile : nombre de cycles moteur sans retour en atelier de celui-ci.