



HAL
open science

Validation expérimentale du modèle brosse pour le freinage des avions sur les pistes mouillées

Jonathan Gerthoffert, Véronique Cerezo, Mohamed Bouteldja, Minh Tan Do

► To cite this version:

Jonathan Gerthoffert, Véronique Cerezo, Mohamed Bouteldja, Minh Tan Do. Validation expérimentale du modèle brosse pour le freinage des avions sur les pistes mouillées. JIFT 2015 - 27ème Journées Internationales Francophones de Tribologie, May 2015, NANTES, France. 8p. hal-01307077

HAL Id: hal-01307077

<https://hal.science/hal-01307077>

Submitted on 26 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Procédés et Génie Civil

27-29 mai 2015
IFSTTAR
Nantes, France

VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE BROSSE POUR LE FREINAGE DES AVIONS SUR LES PISTES MOUILLEES

EXPERIMENTAL VALIDATION OF BRUSH MODEL FOR AIRCRAFT BRAKING ON WET RUNWAYS

J. Gerthoffert¹, V. Cerezo², M. Bouteldja³, M-T. Do²

¹ Service Technique de l'Aviation Civile -31 Avenue du Maréchal Leclerc, 94385
Bonneuil-sur-Marne - France

² ComUE UBL/ IFSTTAR – AME-EASE – Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais
- France

³ CEREMA - 25 Avenue François Mitterrand, 69500 Bron - France

Résumé

Les performances de freinage des avions peuvent être fortement réduites en présence d'eau ou de neige. L'estimation des distances d'atterrissage est alors rendue difficile en raison des phénomènes tribologiques extrêmement complexes entre le pneumatique et la surface contaminée. Afin de fournir au pilote une information fiable et robuste, un tribomètre a été conçu et un modèle est en cours de développement afin d'interpréter ses mesures en termes de performances avion au freinage. Ce modèle est basé sur le modèle Brosse et cet article présente la validation expérimentale de ce modèle pour des pistes mouillées.

Abstract

Aircraft braking performances can be greatly reduced on water- or snow-covered runways. Calculations of landing distances are then difficult due to the complex tribological phenomenon between the tire and the contaminated runway. In order to provide pilots with accurate and robust information, a tribometer has been designed and a model is under development to interpret its measurements in terms of aircraft braking performances. This model is based on the Brush model. This article presents an experimental validation of this model for wet runways.

1. INTRODUCTION

Les performances de freinage des avions sont fortement dépendantes de l'état de surface de la piste. La présence d'eau ou de neige réduit l'adhérence

pneumatique/piste disponible pour la décélération ou le contrôle directionnel [1]. L'analyse statistique des bases de données d'accidents [2] montre que le risque d'une sortie de piste est multiplié par 10 lors d'un atterrissage sur une piste mouillée ou inondée par rapport à une piste sèche, et par 14 dans le cas d'une piste recouverte de glace ou de neige. Il est donc essentiel pour le pilote d'estimer sa distance d'atterrissage à partir des conditions réelles de l'état de surface de la piste afin de décider d'atterrir ou de dérouter son avion.

Plusieurs pistes ont été explorées afin de lier les conditions de surface de la piste aux performances de freinage des avions [3][4][5]. Dans un article précédent [6], il a été démontré qu'une modélisation physique du système composé du pneumatique, du contaminant et de la piste est une approche prometteuse pour atteindre cet objectif.

Cet article présente une validation expérimentale de cette modélisation dans le cas des pneumatiques d'un avion et de celui d'un appareil de mesure de frottement standard au sol (IMAG) pour des pistes mouillées.

2. MODÈLE

Le pneumatique est modélisé à l'aide d'un modèle largement éprouvé dans le domaine automobile [7] et adapté par Jones [8] au cas des avions.

La bande de roulement est modélisée par une succession de poils indépendants (Fig. 1) ayant chacun un comportement élastique. Toutes les variables dans la direction latérale sont supposées constantes : largeur, rigidité, pression. Les poils sont attachés à la carcasse du pneumatique, qui est supposée être infiniment rigide [7]. La déformation de la carcasse est donc supposée négligeable.

Ce modèle fonctionne en trois temps : 1/ le poil entre dans l'aire de contact et adhère à la surface, puis 2/ il s'étire jusqu'à ce que la force de rappel élastique égale la force de frottement statique (point de transition x_s dans la Fig. 1), et enfin 3/ il glisse jusqu'à la sortie de l'aire de contact.

L'aire de contact est donc divisée en deux zones : une zone d'adhésion et une zone de glissement, séparées par le point de transition x_s .

Dans la zone d'adhésion, l'extrémité du poil, en contact avec la surface, adhère à celle-ci. Elle a une vitesse relative par rapport à la surface nulle, mais le point de contact, x_r , se déplace à une vitesse $-v_x$ dans le repère (x, y, z) . La position de ce point est donc donnée par :

$$x_r(x) = a - \int_0^{t(x)} v_x dt \quad (1)$$

Où $t(x)$ représente le temps passé par le poil dans l'aire d'adhésion, et x est la position longitudinale du sommet du poil.

Le sommet du poil se déplace à une vitesse v_c , liée à la vitesse de rotation ω de la roue, différente de la vitesse v_x . Les vitesses v_x et v_c étant supposées constantes sur l'intervalle de temps pendant lequel le poil traverse l'aire d'adhésion, le temps $t(x)$ passé par le poil dans l'aire d'adhésion est égale à :

$$t(x) = \frac{a-x}{v_c} \quad (2)$$

Cette différence instantanée entre la vitesse de rotation de la roue freinée et la vitesse de translation du véhicule implique que le pneumatique glisse partiellement. Ce glissement partiel est exprimé sous la forme d'un taux de glissement défini de la façon suivante :

$$G = \frac{v_x - v_c}{v_x} \quad (3)$$

Ce glissement partiel provoque une élongation longitudinale du poil. Les équations (1), (2) et (3) permettent d'exprimer cette élongation :

$$\Delta x(x) = x_r(x) - x = -\frac{v_x - v_c}{v_c} (a - x) = -\frac{G}{1-G} (a - x) \quad (4)$$

Dans l'aire d'adhésion, la force élémentaire d'adhésion, dF_{ax} , augmente avec l'élongation du poil, Δx :

$$dF_{ax} = c_{px} \Delta x dx \quad (5)$$

Où c_{px} représente la rigidité du poil.

Quand cette force élastique dépasse la force de frottement statique, le poil commence à glisser. Le point de transition, x_s (Fig. 1), est le point où la force élastique égale la force de frottement statique.

$$dF_{ax}(x_s) = \mu_{sx} q_z(x_s) dx \quad (6)$$

Où μ_{sx} est le coefficient de frottement statique (rapport entre la force tangentielle et la force normale au moment où le poil commence à glisser), et q_z représente la force verticale par unité de longueur. Le phénomène de "stick-slip" est négligé dans le calcul du point de transition x_s . La force de glissement, dF_{sx} , est ensuite donnée par la loi de Coulomb.

$$dF_{sx} = \mu_{kx} q_z dx \quad (7)$$

Où μ_{kx} est le coefficient de frottement dynamique (rapport entre la force tangentielle et la force normale au cours du glissement).

En sommant les efforts dans l'aire d'adhésion et dans l'aire de glissement, il est possible d'obtenir une relation entre la force tangentielle, F_x , et cinq paramètres d'entrée décrivant les propriétés du pneumatique (la rigidité des poils, c_{px}), le véhicule (la charge vertical, F_z) et l'interface (les coefficients de frottement statique et dynamique, μ_{sx} et μ_{kx} ; la longueur de l'aire de contact, $2a$).

$$F_x = \int_{x_s}^a dF_{ax} + \int_{-a}^{x_s} dF_{sx} \quad (8)$$

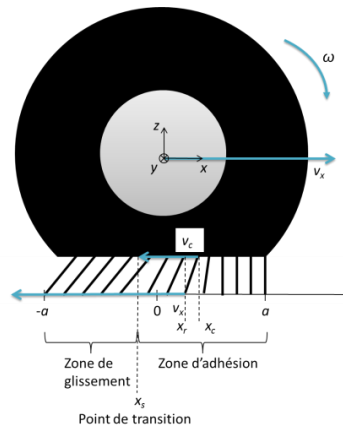


Fig. 1 Schéma de principe du modèle Brosse
Description of the tire Brush model

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental a été réalisé en utilisant l'Instrument de Mesure Automatique de Glissance (IMAG), développé par le Service Technique de l'Aviation

Civile (STAC) et Aéroports De Paris (ADP). Il s'agit d'un appareil couramment utilisé en France sur les pistes aéronautiques, qui mesure un coefficient de frottement longitudinal (CFL) dans des conditions normalisées [9].

L'IMAG est constitué d'un châssis mobile (bras oscillant) contenant la roue de mesure et d'un châssis fixe (Fig. 2). Deux biellettes assurent la liaison entre les deux châssis et la transmission des efforts. Un arbre moteur permet de freiner la roue de mesure. L'effort généré par l'arbre moteur est transmis à la roue de mesure par l'intermédiaire d'une courroie.

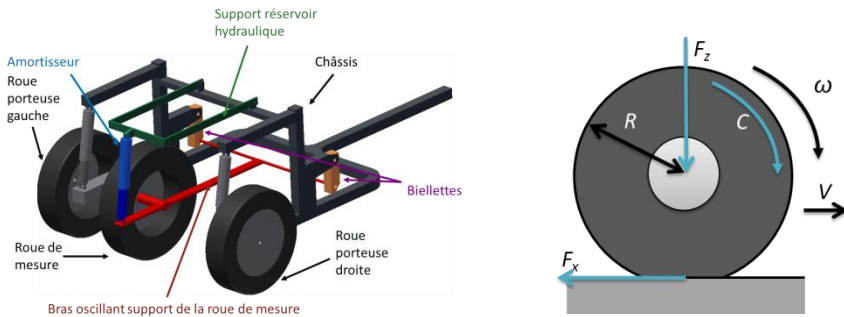


Fig. 2 Schéma simplifié de l'IMAG (gauche) et schéma de principe du système de mesure (droite)

Picture of IMAG (left) and schematic of IMAG measurement principle (right)

Deux capteurs de force sont placés de chaque côté au niveau de la liaison entre les deux châssis (biellettes, Fig. 2). Lorsque la roue de mesure est freinée, le châssis mobile est entraîné en arrière ce qui met les capteurs de force en traction. Les capteurs de force mesurent alors la force nécessaire pour tracter le châssis mobile. Cette force est égale à la force à l'interface entre le pneumatique et la chaussée (F_x).

Un capteur de force est placé en arrière de la roue de mesure, au-dessus de l'amortisseur (F_z , Fig. 2), et permet de mesurer la force verticale appliquée sur la roue de mesure.

Le coefficient de frottement longitudinal est le rapport entre cette force (F_x) et la force verticale appliquée sur la roue de mesure (F_z).

$$CFL = \frac{F_x}{F_z} \quad (9)$$

Trois codeurs de distance sont installés sur l'IMAG : deux au niveau des roues porteuses droite et gauche et le troisième sur l'arbre moteur entraînant la roue de mesure. La différence entre la vitesse de rotation des roues porteuses et de la roue de mesure permet de calculer le taux de glissement de la roue de mesure (équation (3)). Le freinage est alors ajusté pour maintenir constant le taux de glissement.

L'IMAG fonctionne à des vitesses (de translation du véhicule) comprises entre 30 et 100 km/h. La charge verticale appliquée sur la roue de mesure est de 185 kg. Le taux de glissement est réglable entre 0 et 95 %.

Le pneumatique d'essai standard de l'IMAG est un pneumatique lisse normalisée [10], de dimensions 165R15, gonflé à 150 kPa. L'IMAG peut toutefois être équipé d'autres pneumatiques de dimensions similaires. Dans le travail décrit dans cet article, l'IMAG a été également équipé d'un pneumatique d'avion de type 26x6.6 R14 (Fig. 3) gonflé à 150 kPa.



Fig. 3 Photographies du pneumatique AIPCR (gauche) et du pneumatique d'avion utilisé lors des essais (droite)
Picture of a PIARC test tire (left) and the aircraft tire used in the testing (right)

L'IMAG dispose d'un système de mouillage autonome (Fig. 4). Le débit d'eau dans ce système est asservi à la vitesse de l'appareil afin de délivrer en sortie un film d'eau d'une épaisseur théorique de 1 mm :

$$Q = h V l \quad (10)$$

Où Q est le débit dans le système de mouillage, h est la hauteur d'eau à la sortie de la goulotte (1 mm), V est la vitesse de l'IMAG et l est la largeur de la goulotte qui délivre le film d'eau.

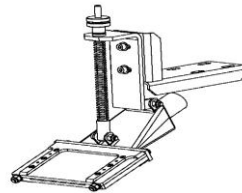


Fig. 4 Photographie (gauche) et schéma (droite) de la goulotte ASTM E 670-94
Picture (left) and schematic (right) of ASTM E 670-94 nozzle

Afin de valider le modèle développé dans le cas des pistes mouillées, un plan d'expérience a été réalisé sur les pistes d'essais de l'IFSTTAR à Nantes. L'objectif était de démontrer que le modèle présenté partie 2 avec cinq données d'entrée permet de décrire le freinage du pneumatique standard de l'IMAG et d'un pneumatique d'avion. Pour cela, les courbes du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement ont été tracées à partir des mesures enregistrées avec l'IMAG. Le plan d'expérience a été réalisé avec :

- Le pneumatique standard de l'IMAG et un pneumatique d'avion,
- Deux vitesses, 30 et 100 km/h, qui sont les vitesses de mesure minimales et maximales de l'IMAG,
- Sept revêtements différents,
- Neuf taux de glissement : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 30, 60, 80 %,
- Deux répétitions pour chaque combinaison.

Les revêtements testés ont des caractéristiques de surface très différentes (Fig. 5) qui permettent de disposer d'une large étendue de coefficients de frottement. Trois surfaces sont plus particulièrement exploitées dans cet article :

- La surface M2 est un béton bitumineux très mince (0/6) : c'est une surface qui a une macrotexture élevée (Profondeur Moyenne de Profil de 1,15 mm)
- La surface E2 est un béton bitumineux semi-grenus (0/10) : cette surface présente également une macrotexture élevée (Profondeur Moyenne de Profil de 1,09 mm)
- La surface G4 est un béton bitumineux souple peint (dosage $\approx 300 \text{ kg/m}^3$) avec charge de silice : cette surface présente une faible macrotexture (Profondeur Moyenne de Profil de 0,53 mm).



Fig. 5 Photographies des surfaces M2 (gauche), E2 (centre) et G4 (droite)
Pictures of surfaces M2 (left), E2 (center) and G4 (right)

4. RÉSULTATS

Les résultats ont été exploités afin de déterminer les paramètres du modèle. Le coefficient de frottement dynamique, μ_{dx} , a été pris égal au coefficient de frottement mesuré par l'IMAG à 80 % de taux de glissement. La longueur de l'aire de contact est obtenue à partir du modèle présenté dans [11]. Les autres paramètres du modèle ont été ajustés numériquement sur les données récoltées. La technique a consisté à minimiser la somme du carré des écarts entre le modèle et les données expérimentales (fonction de performance). Une pondération de 95 % a été appliquée sur la fonction de performance pour les points dont le taux de glissement est strictement inférieur à 30 %. Ce choix a été fait parce que les paramètres ajustés (la rigidité du poil, c_{px} , et le coefficient de frottement statique, μ_{sx}) décrivent le début de la courbe du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement, c'est-à-dire avant que toute l'aire de contact ne soit en glissement ($x_s=a$, Fig. 1).

Cette méthode a permis d'ajuster de façon satisfaisante le modèle aux données expérimentales pour toutes les combinaisons. Les figures 6 à 8 montrent les résultats pour les trois surfaces présentées dans la partie 3. Elles montrent d'abord la bonne répétabilité du système de mesure (les deux répétitions sont systématiquement représentées sur les figures 6 à 8, l'écart-type de répétabilité, σ_r , pour l'IMAG est estimé à $1,10 \cdot 10^{-2}$). Ces figures montrent ensuite que le modèle reproduit fidèlement l'allure des courbes expérimentales. Dans la première partie, la courbe du modèle augmente linéairement avec le taux de glissement, ce qui correspond à la mise en cisaillement progressive des poils dans l'aire d'adhésion. Lorsque le taux de glissement augmente encore, les poils commencent à glisser. Le modèle passe alors par un maximum et diminue lorsque la zone de glissement devient plus grande. Enfin, la dernière partie de la courbe est constante et correspond au domaine où toute l'aire de contact est en glissement. Enfin, les figures 6 à 8 montrent comment le modèle s'adapte aux variations des caractéristiques de surface et de vitesse.

La figure 6 présente les résultats sur la surface M2 à 30 km/h (gauche) et 100 km/h (droite). L'effet de la vitesse est visible dans la figure de gauche par le décalage de la position du maximum, qui est atteint à 6% à 30 km/h alors qu'il est

atteint voire dépassé dès 3% à 100 km/h. La valeur de ce maximum diminue de 0,58 à 30 km/h à 0,48 à 100 km/h.

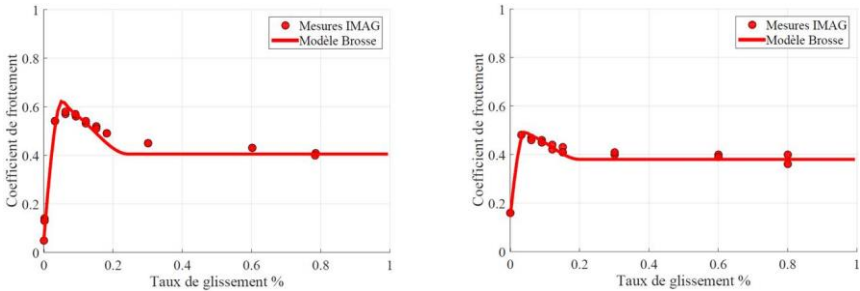


Fig. 6 Résultats pour la surface M2 à 30 km/h (gauche) et à 100 km/h (droite)
Results on surface M2 at 30 km/h (left) and 100 km/h (right)

La figure 7 présente les résultats obtenus à 100 km/h sur la surface E2, qui est plus fermée que la surface M2. Les données expérimentales montrent une quasi-absence de maximum du coefficient de frottement sur cette surface. La présence de ce pic est manifestement liée à la topographie des surfaces. Le travail doit se poursuivre pour aller plus loin dans son interprétation. Le modèle s'ajuste dans ce cas en considérant les coefficients de frottement statique (μ_{sx}) et dynamique (μ_{kx}) comme égaux. Physiquement, cela signifie que l'aire de glissement (Fig. 1) génère davantage d'efforts que l'aire d'adhésion.

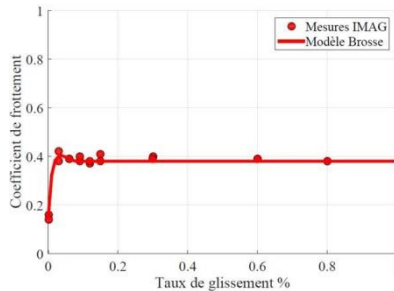


Fig. 7 Résultats pour la surface E2 à 100 km/h
Results on surface E2 at 100 km/h

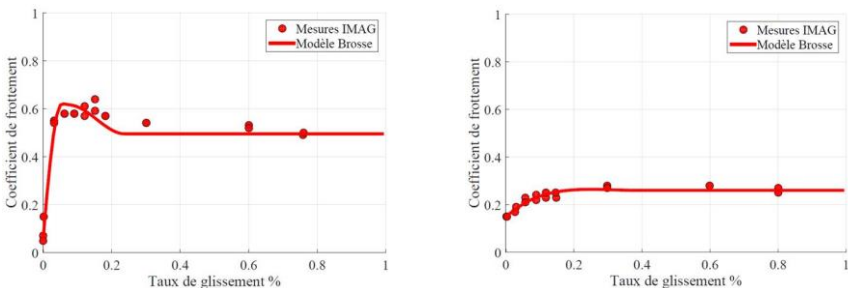


Fig. 8 Résultats pour la surface G4 à 30 km/h (gauche) et 100 km/h (droite)
Results on surface G4 at 30 km/h (left) and 100 km/h (right)

La figure 8 présente les résultats sur la surface G4 à 30 km/h (gauche) et 100 km/h (droite). A 30 km/h, le maximum du coefficient de frottement est situé entre 6 et 15 % de glissement. Ce maximum n'est pas aussi clairement prononcé que sur les autres surfaces. Le modèle a du mal à représenter ce palier du coefficient de frottement. A 100 km/h, il n'y a plus de maximum comme sur la surface E2 à 100 km/h. Cette surface à 100 km/h est également intéressante car elle présente un comportement particulier avec une pente à l'origine de la courbe du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement, ainsi qu'un coefficient de frottement dynamique, μ_{dx} , beaucoup plus faible que sur les autres pistes.

5. CONCLUSION

Un modèle physique, basé sur le modèle Brosse, a été développé pour prévoir la courbe d'évolution du coefficient de frottement en fonction du taux de glissement qui sera ensuite utilisée dans l'estimation de la distance de freinage des avions sur les pistes contaminées. Ce modèle a fait l'objet d'une validation expérimentale pour le cas des chaussées mouillées. Les données expérimentales montrent que le modèle permet de reproduire fidèlement cette courbe pour une grande variété de surface. Le travail se poursuit en se concentrant maintenant sur l'étude des paramètres ajustés afin de mieux comprendre la physique des phénomènes. L'adaptation se poursuit également de façon à inclure d'autres états de surface, tels que la neige non compactée.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Klein-Paste A., Huseby A.B., Anderson J.D., Giesman, P., Braking performance of commercial airplanes during operation on winter contaminated runways, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 79-80 (2012) 29-37.
- [2] Van Es G.W.H. Running out of runway: Analysis of 35 years of landing overrun accidents. Report no. NLR-TP-2005-498, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, 2005.
- [3] Wambold, J. C., & Henry, J. J. Joint Winter Runway Friction Measurement Program - International Runway Friction Index (IRFI) versus Aircraft Braking Coefficient (μ). 2003.
- [4] Subbotin, N., Gardner, S. Takeoff and Landing Performance Assessment Validation Effort of the Runway Condition Assessment Matrix. June 2013.
- [5] Klein-Paste, A. Bugge, H-J., Husebyc, A. B. A decision support model to assess the braking performance on snow and ice contaminated runways, *Cold Regions Science and Technology*. vol. 117 (2015) 43-51
- [6] Gerthoffert, J. Cerezo, V. Bouteldja, M. Do, M-T. Modeling aircraft braking performance on wet and snow/ice-contaminated runways, *Proc. IMechE Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 229(9) (2015) 1065–1078
- [7] Svendenius J., *Tire Modeling and Friction Estimation*, PhD thesis, ISSN 0280–5316, Department of Automatic Control, Lund University, Lund, April 2007
- [8] Jones L., *Modélisation des forces de contact entre le pneu d'un avion et la piste*, PhD thesis, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, 2012.
- [9] Agence Française de Normalisation (2014). Road and airfield surface characteristics - Part 15: Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal controlled slip (LFCL): The IMAG. Norme. AFNOR. CEN/TS 15901-15
- [10] AIPCR, Spécifications d'un pneu d'essai standard pour la mesure d'un coefficient de frottement d'une surface de chaussée : le pneu lisse, Comité technique AIPCR 1 Caractéristiques de surface (2004).
- [11] Cerezo, V. Gothié, M. Menissier, M. Gibrat, T. Hydroplaning speed and infrastructure characteristics, *Proc. IMechE Part J: J. Engineering Tribology*, vol.224 (2010) 891-898.