

INFLUENCE DE LA RUGOSITE DU GIVRE SUR SA CROISSANCE PAR LA CAPTATION DES GOUTTES D'EAU SURFONDUE: APPLICATION AU GIVRAGE DES CABLES ELECTRIQUES

P. Personne, C. Duroure

▶ To cite this version:

P. Personne, C. Duroure. INFLUENCE DE LA RUGOSITE DU GIVRE SUR SA CROISSANCE PAR LA CAPTATION DES GOUTTES D'EAU SURFONDUE: APPLICATION AU GIVRAGE DES CABLES ELECTRIQUES. Journal de Physique Colloques, 1987, 48 (C1), pp.C1-389-C1-395. 10.1051/jphyscol:1987154. jpa-00226300

HAL Id: jpa-00226300 https://hal.science/jpa-00226300

Submitted on 4 Feb 2008

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.

INFLUENCE DE LA RUGOSITE DU GIVRE SUR SA CROISSANCE PAR LA CAPTATION DES GOUTTES D'EAU SURFONDUE : APPLICATION AU GIVRAGE DES CABLES ELECTRIQUES

P. PERSONNE et C. DUROURE

Laboratoire Associé de Météorologie Physique⁽¹⁾, Université de Clermont-Ferrand II, B.P. 45, F-63170 Aubière, France

Résumé.-L'effet de la rugosité des dépôts de givre sur la captation des gouttes est étudié. Une paramétrisation du coefficient de captation est proposée. Pour utiliser cette paramétrisation, l'évolution de la rugosité relative a été simulée. La formulation du coefficient de captation a été utilisée dans le cas du givrage des câbles électriques.

Abstract.-The collection efficiency of droplets is studied as a function of the ice deposit roughness. A parameterization of this efficiency is suggested. In order to apply this parameterization, the evolution of the relative roughness is simulated. The equation is confirmed in the case of ice accretion on transmission lines.

Introduction .- Les gouttes nuageuses d'eau liquide surfondue, lorsqu'elles heurtent un obstacle, vont se congeler et former un dépôt de givre. Selon la vitesse d'écoulement, il existe de grandes différences de morphologie des dépôts de givre formés en croissance sèche. C'est-à-dire lorsque la température de l'obstacle est négative ce qui correspond au cas général du givre accrété à faible vitesse (1) . A forte vitesse, les dépôts de givre sont compacts. A faible vitesse, le givre est constitué de formes triangulaires qui se développent en des points discrets de l'obstacle (2). La captation des gouttes à partir de ces points discrets (Cliché A) suppose une influence de la rugosité sur l'efficacité de captation des gouttes.

Jusqu'à présent, les modes de calcul utilisés supposent que la rugosité de l'obstacle n'intervient pas directement sur la captation des gouttes. Ce type de modèle(3) ne permet de comprendre ni les surcharges de givre importantes mesurées sur des câbles électriques par McComber et Govoni (4) ni les



Cliché A.- Formation de givre à partir de points discrets sur un câble électrique. (V = 5,6 m s⁻¹, W = 0,32 g m⁻³, Δt = 2h)

⁽¹⁾ Laboratoire Associé au C.N.R.S. Nº 267

valeurs des coefficients de collection mesurés en soufflerie par Personne et Gayet [5]. Une paramétrisation de l'effet de la rugosité sur le coefficient de collection a donc été étudiée.

Paramétrisation du coefficient de captation pour un obstacle rugueux.- Dans le cas d'un cylindre lisse et d'un écoulement bidimensionnel, le coefficient de captation E_1 est défini comme le rapport de deux fois l'ordonnée amont de la trajectoire de goutte qui est tangente au cylindre, sur le diamètre du cylindre D (figure 1).

$$E_1 = \frac{2 y}{D}$$

Ce coefficient dépend principalement du diamètre du cylindre, de la vitesse d'écoulement de l'air et de la masse de la goutte. Depuis les travaux de Langmuir et Blodgett (6), de nombreuses estimations de ce coefficient ont été données.

S'il existe à la surface du cylindre des protubérances dont la hauteur ε est petite devant le rayon du cylindre, on peut considérer que le champ aérodynamique autour du cylindre n'est pas modifié (figure 2). En première approximation, le coefficient de captation sera E_1 .

A cette captation (E_1) , on peut ajouter en deuxième approximation la captation des gouttes due à la rugosité de la surface (E_{rug}) :

$$E_{Tot} = E_1 + (1 - E_1) E_{rug}$$
 (1)

Les irrégularités de surface ont une échelle caractéristique nettement plus petite que celle du cylindre. On peut donc su pp os er que les protubérances superficielles ont une efficacité de collection importante $(\simeq 1)$. Par conséquent, la probabilité (E_{rug}) qu'une goutte soit captée par ces protubérances est équivalente à la probabilité que cette goutte rencontre une telle possible irrégularité. Il est d'estimer E (figure 2) en l'interprétant comme une probabilité composée :

$$E_{rug} = P1 \cdot P2$$

où P1 est la probabilité qu'une goutte passe à l'intérieur de la couche rugueuse :

$$P1 = 2 A \frac{\varepsilon}{D}$$

avec A constante adimensionnée. P2 est la probabilité qu'une goutte soit captée par une protubérance au cours d'un parcours de longueur L dans la couche rugueuse. Pour raison de simplicité, on suppose que la probabilité qu'une goutte, présente en L, soit captée entre L et L + dl



Fig.1.- Le champ aérodynamique autour du cylindre lisse est représenté dans la partie inférieure de la figure. En pointillé la trajectoire de goutte qui est tangente au cylindre.



Fig.2.- Le champ aérodynamique autour d'un cylindre rugueus est représenté dans la partie inférieure de la figure du bas. Les trajectoires des gouttes sont représentées en trait discontinu. La surface hachurée correspond à la "captation lisse" des gouttes (cf. figure 1). est proportionnelle à dl . La probabilité de captation d'une goutte entre L et L + dl est alors donnée par :

$$dP2 = (1 - P2 (0, L)) \frac{d1}{L_0}$$

En intégrant cette expression de 0 à L, on obtient :

P2 (0, L) = 1 -
$$e^{-L/L_0}$$

où L₀ représente une longueur caractéristique pour laquelle la probabilité de capture est de 63%. Cette longueur peut dépendre de la densité et de la taille des protubérances. Ainsi si la surface a de nombreuses irrégularités, L₀ sera petit et inversement. Dans le cas d'un cylindre à surface rugueuse, on peut prendre L comme la longueur maximale qu'une goutte peut parcourir dans la couche rugueuse. Dans ce cas, elle est proportionnelle au diamètre D du cylindre : L = β D. La valeur du coefficient β dépend probablement de la vitesse d'écoulement, de l'angle maximum d'impact des gouttes captées par inertie, etc.

En utilisant ces expressions pour P1 et P2, on peut écrire l'équation (1) sous la forme :

$$E_{\text{Tot}} = E_1 + (1 - E_1) 2A \frac{\varepsilon}{D} (1 - e^{-\beta D/L_0})$$
(2)

L'utilisation de la formule (2) suppose la connaissance de l'évolution de la hauteur de rugosité ε en fonction de la croissance du dépôt de givre. En l'absence de données expérimentales, la rugosité relative ε/D peut être supposée constante tout au cours de la croissance du givre , ceci après une phase initiale durant laquelle les conditions de surface de l'obstacle non givré doivent être prises en compte.

Bien qu'il n'y ait Das confirmation que cette hypothèse soit acceptable ou non dans le cas de givre formé par captation de gouttelettes d'eau surfondue, on peut rapprocher cette hypothèse des résultats obtenus avec la simulation de la croissance par captation de particules à trajectoire balistique. Les particules sphériques d'un même diamètre d sont empilées de façon aléatoire dans une boîte dont la base carrée mesure 100 d x 100 d. Les positions possibles des gouttes sont discrétisées (7]. Le mécanisme de cette croissance semble schématiser convenablement la croissance du givre par captation de gouttelettes d'eau surfondue en régime sec. La figure 3 représente l'évolution de la hauteur de rugosité ϵ en fonction du nombre de gouttes collectées. Compte tenu que la densité de ce type de dépôt est constante [8] et que seule la hauteur du dépôt varie au cours de l'empilage, la figure 3 illustre que la hauteur de rugosité varie guasi linéairement avec la hauteur h du dépôt. La rugosité relative (ϵ/h) peut donc être considérée comme constante.



Fig.3.- Evolution de la hauteur de rugosité ε d'un dépôt obtenu à l'aide d'un modèle balistique discret en fonction du nombre de gouttes empilées.

Dans le cas d'un dépôt cylindrique on a :

$$\frac{\varepsilon}{D} = \gamma$$

avec Y constante.

Sur la figure 4, les valeurs des coefficients E_1 , $(1 - E_1)E_{rug}$ et E_{Tot} ont été tracées en fonction du diamètre D d'un dépôt de givre cylindrique. E_1 a été calculé en utilisant la paramétrisation de Lozowski et al. (9) et en supposant un diamètre de goutte de 12 µm, une vitesse de vent de 10 m s⁻¹ et une température de -5°C. Pour estimer E_{rug} la relation suivante a été utilisée :

 $E_{rug} = 2A \gamma (1 - e^{-\beta D/L_0})$ (3)

Dans cette équation le coefficient A a été supposé égal à 1. Pour les faibles vitesses de vent, compte tenu du contournement parfait du cylindre par les lignes de flux, la longueur maximale parcourue par une goutte dans la couche rugueuse $(L = \beta D)$ est supposée être égale à ID/2. γ a été choisi égal à la valeur initiale d'un câble électrique nu ($\gamma = 0,1$). La valeur 0,15 m a été attribuée arbitrairement à L_0 .

La figure 4 permet de distinguer 3 régimes différents d'évolution du coefficient de captation E_{rot} en fonction du diamètre : - un régime de "captation lisse" lorsque le diamètre du cylindre est petit

- un régimé de "captation lisse" lorsque le diamètre du cylindre est petit (D < 0,03 m) (ou que l'inertie des gouttes est grande). E_{Tot} décroît avec le diamètre. Dans ce cas, on a :

- un régime de "captation rugueuse incomplète". Dans ce cas $\beta D < L_0$ (0,03 < D < 0,15 m) et E_{Tot} croît avec le diamètre.

- un régime de "captation rugueuse complète" lorsque $\beta D > L_0$. Dans ce cas P2 $\simeq 1$ et E_{Tot} est constant.

Croissance de givre autour des câbles électriques aériens.-Le givrage des câbles électriques est caractérisé par des vitesses de vent faibles (< 25 m s⁻¹) (10). Le diamètre des gouttes des brouillards givrants est généralement compris entre 12 et 20 μ m. Sous l'effet du poids du givre et de la force de pression du vent, les câbles givrés tournent de telle façon que le givre se dépose tout autour du câble et presque forme des manchons cylindriques (5). Le diamètre de ces manchons peut atteindre une dimensions de 10 à 15 cm.

La surcharge (M) due au dépôt de givre, c'est-à- dire la masse de givre par unité de longueur de câble, a été mesurée en condition givrante naturelle par McComber et Govoni (4). Ces auteurs ont montré qu'il y a une période où la masse de givre croît exponentiellement en fonction du temps.

La surcharge est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\frac{dM}{M} = \frac{E_{Tot}}{D} \frac{4VW}{\Pi P} dt \qquad (4)$$



Fig.4.- Evolution en fonction du diamètre (D) du manchon de givre, des coefficients de captation E_1 (courbe en pointillé), $(1 - E_1)E_{rug}$ (courbe en trait discontinu) et E_{Tot} (courbe en trait continu) (V = 10 m s⁻¹, T = -5°C, $d = 12 \ \mu m$, pression = 850 hPa).

où V est la vitesse, W la teneur en eau nuageuse, D le diamètre du manchon de givre, ${}^{\mathcal{P}}$ la densité du givre et M la masse de givre par unité de longueur (M = $\Pi D^2 {}^{\mathcal{P}}/4$). L'équation (4) montre que pour une évolution exponentielle de la surcharge $\alpha = E_{m,+}/D$ doit être indépendant de D.

surcharge $\alpha = E_{Tot}/D$ doit être indépendant de D. Par conséquent, cette évolution exponentielle ci-dessus citée, ne peut pas être expliquée par la captation des gouttes due seulement à leur inertie $(E_{Tot} = E_1)$, puisque le coefficient de captation E_1 décroît avec le diamètre D (figure 4).

Par contre, α peut être indépendant de D dans le cas où la captation des gouttes par les irrégularités de surface est prise en compte. Lorsque le diamètre des manchons est grand $E_1 << 1$ et si $\beta D/2 << L_0$ un développement limité du premier ordre de P2 permet d'écrire :

$$E_{\text{Tot}} = \frac{2AY\beta}{L_0} D$$

on peut identifier α égal à : $\alpha = \frac{2A\gamma\beta}{L_0}$ (5)

Il n'est pas possible d'évaluer individuellement tous les paramètres de l'expression (5). Une estimation globale de α a cependant été faite avec les données de McComber et Govoni **(4)**. Sur la figure 5 les valeurs calculées de α ont été reportées en fonction de l'inverse de la vitesse. D'après cette figure il semble que α soit lié effectivement à la vitesse.

Cette valeur de α , calculée à l'aide de la régression linéaire de la figure 5, a été utilisée pour comparer notre paramétrisation de E_{Tot} avec les données expérimentales de Personne et Gayet (5). Ces données ont été collectées dans une soufflerie instrumentée opérant en nuage naturel. La vitesse d'écoulement était de l'ordre de 10 m s⁻¹. Le diamètre des câbles non givrés était de 0,015 m ou 0,031 m et la taille maximale des manchons n'excédait pas 0,06m.

Sur la figure 6, les valeurs expérimentales du coefficient de captation sont représentées par des • ou des •. Ces valeurs sont très supérieures aux valeurs calculées en première approximation à l'aide du coefficient de captation



Fig.5.- Evolution du coefficient α calculé avec les données de McComber et Govoni (4) enfonction de l'inverse de la vitesse :

$$\alpha = 25,88 \frac{1}{V} - 0,65$$

Corrélation : 0,95



Fig.6.- Comparaison entre le coefficient ETot calculé (courbe en trait plein) et ceux mesurés en soufflerie (\bullet , \blacksquare). Diamètre initial des câbles 0,015 (\bullet) et 0,031 m (\blacksquare).

lisse E_1 . La courbe en trait plein de la figure 6 est le coefficient de captation totale calculé en seconde approximation : c'est-à-dire en prenant en compte la captation liée à l'inertie des gouttes et celle liée à la rugosité du dépôt. Pour une vitesse d'écoulement de 10 m s⁻¹, la valeur de α calculée est 2,03. L'expression du coefficient de captation totale peut alors s'écrire :

$$E_{Tot} = E_1 + (1 - E_1) 2,03 D$$

Un bon accord existe entre les points expérimentaux et les valeurs calculées. Ce résultat met en évidence que pour les grands diamètres de manchons de givre, le mécanisme de captation liée à la rugosité du dépôt doit être pris en compte lorsque les vitesses du vent sont faibles.

Conclusions. La prise en compte de la rugosité sur la captation des gouttelettes d'eau surfondue n'est pas négligeable dans le cas du givrage provoqué par des vitesses d'écoulement faibles. Une paramétrisation de ce ménanisme est proposée. Avec les données expérimentales de McComber et Govoni (4) il a été possible d'estimer globalement les coefficients intervenant dans cette paramétrisation. Les coefficients de captation ainsi calculés sont en accord avec ceux mesurés indépendamment en soufflerie par Personne et Gayet (5). La prise en compte de ce phénomène modifie la masse de givre calculée. L'évolution de la surchage en fonction du temps est exponentielle dans le cas du givrage des câbles électriques. Cependant la détermination des coefficients empiriques reste globale et relativement imprécise. Des études expérimentales plus précises devraient permettre de mieux quantifier ces divers coefficients.

Remerciements. Nos remerciements vont à la Division Etudes et Recherches d'E.D.F. pour son soutien financier à travers le contrat "Etude du givrage des câbles électriques".

Notre reconnaissance va au Professeur R.G. Soulage et au Docteur H. Isaka pour la confiance qu'ils nous ont témoignée et pour les nombreux conseils qu'il nous ont prodigués.

Nous remercions enfin vivement Melle A. Bianchi, Mme J. Squarise et Melle O. Guillot pour le soin qu'elle ont apporté à la mise en forme de ce texte.

Références.-

- (1) PERSONNE, P., GAYET, J.F., J. Rech. Atmos., 18, (1984) 263-279.
- (2) PERSONNE, P., DUROURE, C., this Conference.
- (3) MAKKONEN, L., J. Climate Appl. Meteor., 23, (1984) 929-939.
- (4) McCOMBER, P., GOVONI , J.W., Easter Snow Conference, Montreal, (1985).
- (5) PERSONNE P., GAYET, J.F., 3rd International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures, Vancouver, (1986).
- (6) LANGMUIR, J., BLODGETT, K.B., G.E. Report, R.L. 244, reprinted in Collected Works of I. Langmuir, Pergamon Press, (1946) 335-393.
- (7) FAMILY, F., VICSEK, T., J. Phys. A., 18, (1985) L75-L81.
- (8) MEAKIN, P., Phys. Rev. A, 27, (1983) 2616-2623.
- [9] LOZOWSKI, E.P., STALLABRASS, J.R., HEARTY, P.F., J. Climate Appl. Meteor., 22, (1983) 2053-2062.
- (10) GLAND, H., Journée d'études de la SEE sur les lignes aériennes face à l'environnement climatique, Gif-sur-Yvette, (1985).

COMMENTS

Remark of N. FUKUTA :

I agree with you that roughness factor is important in riming. An example is hailstone. Lobes of hailstones develop in peculiar manner and they are not round.

L. LEVI

Why the effect of roughnesses on the collection factor was not observed in tunnel experiments ?

Answer :

The effect of roughness can be only observed when the collection efficiency on a smooth surface is low (<0.2) and when the rough layer has a high thickness. The icing on transmission lines occurs with these two conditions. The smooth collection efficiency is low because the ice deposits are large (>10 cm), the airspeeds are low (<25 ms⁻¹) and the droplet diameter is ranged from 12 to 20 m.

The thickness of rough layer is important because the duration of icing conditions is very long (>24 h). Indeed this thickness increases when the ice deposit diameter increases with time.

The majority of tunnel experiments are characterized by high collection efficiency (cylinder diameter ~ 2 cm or high airspeed or large droplet diameter $\sim 40 \ \mu$ m (nozzle)). Moreover the duration of these experiments does not exceed 1 hour. It is not sufficient to develop an important roughness.

For all these reasons it is not possible to compare our experiment (airspeed 10 ms⁻¹, ice deposit \sim 4 cm, droplet diameter \sim 14 μ m and duration of test varying from 7 to 22 hours) and the others wind tunnel experiments.

Remark of F. PRODI :

(Intervening to comment, after Dr. Levis's question) : We compared experimental values of accreted mass with those theoretically predicted by the Lozouski model only for times of the order of few hundred seconds ; in this period the fixed deposit might not yet have developed strong irregularities. Moreover, we were in a range of not too low density of the deposit.