



HAL
open science

Identification et modélisation des sources d'incertitudes de l'essai de polissage accéléré Wehner et Schulze

Smail Hamlat, Julija Vasiliauskaite, Olivier Boujard, Paul Marsac

► To cite this version:

Smail Hamlat, Julija Vasiliauskaite, Olivier Boujard, Paul Marsac. Identification et modélisation des sources d'incertitudes de l'essai de polissage accéléré Wehner et Schulze. 24èmes Journées internationales Francophones de Tribologie, May 2012, France. 11p. hal-00850755

HAL Id: hal-00850755

<https://hal.science/hal-00850755v1>

Submitted on 8 Aug 2013

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.

Identification et modélisation des sources d'incertitudes de l'essai de polissage accéléré Wehner et Schulze

Smail HAMLAT¹, Julija VASILIAUSKAITE², Olivier BOUJARD¹, Paul MARSAC³

¹Département Laboratoire et CECP d'Angers - 23, avenue de l'Amiral Chauvin
BP 20069, 49136 Les Ponts de Cé Cédex

²Département de Mathématiques de l'Université de Nantes
1 Quai de Tourville, 44000 Nantes

³Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
(IFSTTAR) – Groupe Matériaux
Route de Bouaye, 44344 BOUGUENNAIS CEDEX

Contact : Smail.Hamlat@developpement-durable.gouv.fr – Tél : 02 41 79 13 25

Résumé :

La machine Wehner et Schulze est utilisée pour étudier en laboratoire l'évolution du frottement de surfaces routières au cours d'un polissage accéléré. Jusqu'ici, aucune étude approfondie n'a été menée pour évaluer les différentes sources d'incertitude de l'essai et leur impact sur l'incertitude globale.

On se propose donc dans cet article, d'identifier les sources principales d'incertitudes de l'essai et d'évaluer leur impact sur l'incertitude globale en fonction de ces sources. Dans un premier temps, les principales sources d'incertitudes sont identifiées. Leurs influences sur le résultat de l'essai sont ensuite évaluées via la définition et le dépouillement d'un plan d'expériences (création de modèles). Ensuite, l'analyse de variance (ANOVA) permet d'évaluer la significativité des paramètres et leurs interactions.

Enfin, après ajustement et validation du modèle de propagation, l'incertitude type de l'essai est estimée.

Mots-clé : frottement, polissage, propagation d'incertitude, analyse de la variance (ANOVA)

1. Contexte et introduction

L'adhérence entre un pneumatique et un revêtement routier représente une des propriétés d'usage essentielles, notamment en temps de pluie, conditionnant la capacité de freinage et de contrôle directionnel des véhicules.

L'adhérence offerte par la couche de roulement des chaussées dépend en partie de sa texture de surface qui est conditionnée par la technique routière utilisée et ses constituants, notamment la nature pétrographique et minéralogique des granulats.

La circulation des véhicules, notamment les poids lourds, engendre un phénomène de polissage des granulats en surface exposés à l'action mécanique du contact direct avec les pneumatiques. Cela se traduit par un émoussement des aspérités micrométriques et une baisse de l'adhérence.

La machine Wehner et Schulze permet de simuler, en laboratoire, un polissage accéléré en différentes phases [1]. Nous proposons dans cet article, d'évaluer les différentes sources d'incertitude de l'essai et leur influence sur l'incertitude composée finale. Cette démarche est couramment utilisée dans les domaines industriels sensibles à la notion du risque [2] [3] [4].

2. Principe de fonctionnement de la machine Wehner & Schulze

La machine Wehner & Schulze (Fig. 1) est composée de deux postes séparés, totalement automatisés : un poste de polissage simulant l'action du trafic routier et un poste de mesure de frottement reproduisant l'action d'une roue bloquée lors d'un freinage en présence d'eau. L'essai peut être pratiqué tant sur des mosaïques de granulats que sur des plaques ou des carottes d'enrobés.

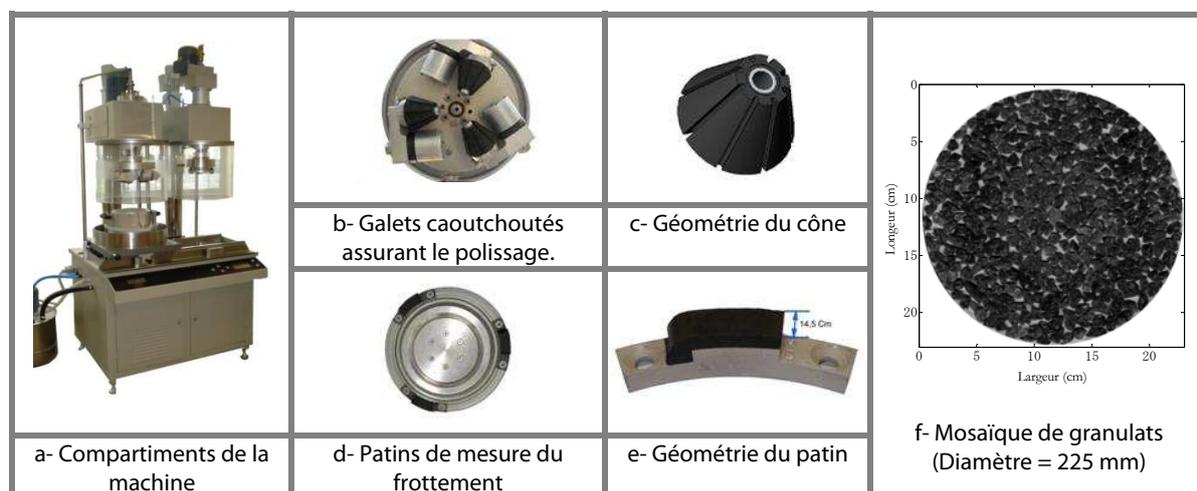


Fig. 1- Présentation des fonctions de la machine Wehner et Schulze

Le polissage est simulé par le roulement des trois galets coniques en caoutchouc strié (Fig. 1b) à une vitesse de 500 tours/min, suivant une couronne sur la surface de l'échantillon. Il est renforcé par un léger glissement des galets et un apport constant d'un mélange d'eau et de silice de granulométrie moyenne d'environ 40 μm . La concentration de la solution abrasive à l'état initial est de 60 g/l.

Le poste de caractérisation de l'état de polissage par la mesure du frottement est constitué d'une couronne munie de trois patins de gomme (Fig. 1c). Cette couronne est mise en rotation et accélérée jusqu'à atteindre une vitesse tangentielle d'environ 100 km/h au niveau des patins. Elle est alors freinée jusqu'à l'arrêt par application des patins sur la surface de l'échantillon sous un arrosage continu de 20 l/s. Le coefficient de frottement μ_{WS} est alors mesuré pour différentes vitesses, la majeure partie des praticiens travaillant sur cet appareil choisissent le frottement qui correspond à la vitesse utilisée dans la mesure de l'adhérence transversale avec le SCRIM (60 km/h).

Les essais de cette étude sont réalisés avec la procédure suivante : solution abrasive neuve à chaque essai, mesure de frottement aux différents stades de polissage 0 (état initial), 5000, 10 000, 15 000, 90 000, puis 180 000 passages de cônes. Néanmoins, nous nous intéresserons ici tout particulièrement au frottement initial, qui permettra d'isoler l'impact de la partie mesure de l'essai, et au frottement après 180 000 passages de cônes, qui est conditionné par les paramètres liés à la fois à la mesure et au polissage.

Pour des raisons pratiques, nous avons choisi de réaliser nos essais sur des surfaces en mosaïques de granulats (Fig. 1f)

3. Identification des sources d'incertitude et élaboration du plan d'expérience

Démarche adoptée

La démarche adoptée pour la modélisation des incertitudes de l'essai de polissage accéléré Wehner et Schulze repose sur l'analyse de son processus de mesure du coefficient de frottement de façon à recenser les facteurs susceptibles d'influencer le résultat puis, à partir des facteurs retenus comme variables d'entrée, à définir un plan d'expérience adapté. Le dépouillement des résultats expérimentaux débouche sur un modèle linéaire prédictif de l'influence des paramètres étudiés et leurs interactions. Nous avons utilisé l'analyse de la variance (ANOVA) pour évaluer la significativité des paramètres et leurs interactions possibles (Fig. 2). Enfin, après ajustement et validation du modèle de propagation Gauss-Laplace, l'incertitude type de l'essai est estimée.

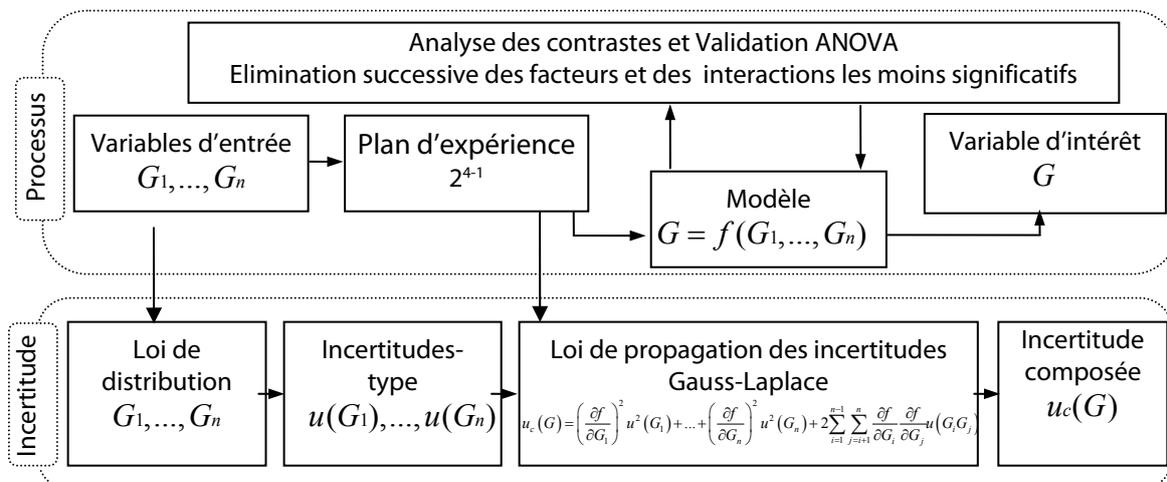


Fig. 2 – Démarche adoptée

Construction d'un plan d'expérience et exploitation statistique

Le retour d'expérience de la pratique de cet essai [1] [5] [6] nous a amené à sélectionner un certain nombre de paramètres dont l'influence sur le frottement Wehner et Schulze " μ_{ws} " est avérée ou soupçonnée. Les facteurs retenus comme paramètres d'entrée du plan d'expériences sont les suivants :

- Trois paramètres quantitatifs :
 1. La performance intrinsèque des granulats vis-vis de la résistance au polissage. Le critère de caractérisation est le PSV (Polished Stone Value) qui est un essai d'origine anglaise défini par la norme NF EN 1097-8 [7]. L'essai consiste à soumettre une plaquette courbe constituée d'une mosaïque de granulats 7,2/10 mm au polissage sous l'action d'une roue et l'apport d'un mélange d'eau et d'abrasif. Le PSV est défini comme étant la valeur du frottement mesuré en présence d'eau à l'aide d'un pendule SRT (Skid Resistance Tester) selon la norme NF EN 13036-4 [8].
 2. Etat d'usure des gommages de polissage. Les phénomènes observés sur les gommages de mesure sont aussi constatés sur les gommages des cônes de polissage illustrés sur la figure 1c. Le contact prolongé et agressif avec les surfaces testées et la solution abrasive génère une usure et une modification des propriétés rhéologique des gommages de polissage.
 3. Etat d'usure des gommages de mesure de frottement " μ_{ws} ". A l'état neuf, l'épaisseur de la gomme des patins de mesure (Fg. 1e) est de 5 mm, au fur et à mesure de la réalisation des mesures selon le protocole indiqué dans le paragraphe 2, l'épaisseur de la gomme diminue et son état de surface se dégrade en fonction de l'agressivité des textures caractérisées. Pour le projet de norme de cet essai [9] nous avons proposé une épaisseur minimale de 2 mm.
- Un paramètre qualitatif :
 4. Le niveau d'expérience de l'opérateur qui fabrique les mosaïques de granulats. Le frottement caractérisant un corps d'épreuve est directement lié aux arrangements granulaires en surface. Dans cette partie nous nous efforçons de fabriquer des échantillons reproduisant un contact plan-plan, cependant, l'homogénéité de l'état de surface dépendra de l'expérience de l'opérateur.

Aucun modèle physique ou empirique ne permet actuellement de relier ces 4 paramètres aux valeurs du coefficient de frottement " μ_{ws} ". En faisant l'hypothèse de linéarité de l'évolution du frottement dans le domaine de variation examiné, deux niveaux pour chaque facteur sont considérés. Le Tableau 1 donne les quatre facteurs avec leurs niveaux haut et bas. Notant que le signe (-) correspond au niveau bas et le signe (+) au niveau haut de chaque paramètre.

Paramètre	Niveau bas (-)	Niveau haut (+)
Facteur A : performance des granulats (PSV)	50	58
Facteur B : état d'usure de gomme des cônes de polissage	Etat usé (après 6 millions de passages)	Etat neuf
Facteur C : épaisseur de gomme des patins de mesure de frottement	2 mm	5 mm
Facteur D : niveau d'expérience de l'opérateur qui fabrique les mosaïques	novice	expérimenté

TAB. 1 – Paramètres d'entrée du plan d'expériences

Pour obtenir une estimation satisfaisante de l'influence de chacun des paramètres, chacun des essais du plan d'expérience est répété 3 fois.

Un plan factoriel complet 2^4 (16 essais x 3 répétitions), qui permettrait d'évaluer les 16 effets inhérents à l'étude des 4 facteurs, serait trop onéreux et demanderait plus de temps. Pour cette raison, nous avons décidé de limiter le nombre d'essais en adoptant un plan factoriel fractionnaire 2^{4-1} (8 essais), ce qui porte donc à 24 le nombre total d'expériences à réaliser.

Nous avons pris la précaution de choisir ces essais pour que notre matrice soit une matrice orthogonale d'Hadamard. Cette disposition permet d'atteindre la variance minimale sur les effets des facteurs en " N " expériences, la matrice associée au plan doit vérifier la relation :

$$X'.X = N.I_d$$

où X' est la matrice transposée de X , I_d est la matrice unité et $X'X$ est la matrice de produit, $N = 2$ ou multiple de 4 (dans notre cas $N = 8$)

Dans un tel plan, il y a 3 paramètres principaux et 1 paramètre secondaire, dont l'effet sur le frottement " μ_{ws} " sera confondu avec celui d'une interaction d'ordre 3 ($D = A.B.C$), il s'agit d'un phénomène d'alias. Ce plan d'expérience (Tab. 2) permet alors d'estimer l'effet de chacun des paramètres, ainsi que celui de trois interactions d'ordre 2 ($A.B$, $B.C$, $A.C$). 7 paramètres ont donc été conservés comme étant influents sur la réponse du plan d'expérience. Le modèle analytique qui en découle est donné par l'Equation 1 :

$$\mu_{ws} = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4D + a_{12}AB + a_{13}AC + a_{23}BC + \varepsilon \quad (1)$$

	A	B	C	D=A.B.C	A.B	B.C	A.C	I=ABCD	Y: réponse
Essai 1	-	-	-	-	+	+	+	+	y1
Essai 2	+	-	-	+	-	+	-	+	y2
Essai 3	-	+	-	+	-	-	+	+	y3
Essai 4	+	+	-	-	+	-	-	+	y4
Essai 5	-	-	+	+	+	-	-	+	y5
Essai 6	+	-	+	-	-	-	+	+	y6
Essai 7	-	+	+	-	-	+	-	+	y7
Essai 8	+	+	+	+	+	+	+	+	y8
Contraste	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	

TAB. 2 – Construction d'une matrice d'expériences

La significativité des effets sera appréciée dans un premier temps par le calcul des contrastes à l'aide de l'Equation 2 :

$$h = \frac{\sum_i^N (\pm Y_i)}{N} \quad \text{avec } N : \text{nombre d'essais} \quad (2)$$

Résultats et analyse

L'analyse des résultats est réalisée avec le langage « R » qui est un environnement mathématique utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique.

Il est à noter que les essais sont réalisés dans un ordre aléatoire issu d'un tirage au sort. Cette méthode de randomisation permet d'éviter les erreurs systématiques liées à des petites variations dues à des facteurs non contrôlés comme l'usure des gommages qui s'accroît au fur et à mesure de la réalisation des essais. Le tableau 3 liste les essais du plan d'expérience par ordre de réalisation ainsi que les réponses obtenues.

Essai	A	B	C	D=A.B.C	A.B	B.C	A.C	I=A.B.C.D	μ_{ws} à l'état initial	μ_{ws} à 180000 Passages
1	-	-	+	+	+	-	-	+	0.532	0.329
2	+	-	+	-	-	-	+	+	0.529	0.426
3	-	+	+	-	-	+	-	+	0.507	0.293
4	+	+	+	+	+	+	+	+	0.480	0.394
5	-	+	-	+	-	-	+	+	0.548	0.312
6	+	+	-	-	+	-	-	+	0.550	0.424
7	-	+	-	+	-	-	+	+	0.537	0.300
8	+	-	-	+	-	+	-	+	0.518	0.433
9	-	-	-	-	+	+	+	+	0.594	0.332
10	-	-	-	-	+	+	+	+	0.573	0.337
11	+	+	-	-	+	-	-	+	0.538	0.423
12	+	+	+	+	+	+	+	+	0.490	0.391
13	-	+	+	-	-	+	-	+	0.521	0.315
14	+	+	-	-	+	-	-	+	0.515	0.410
15	-	-	-	-	+	+	+	+	0.575	0.332
16	+	-	-	+	-	+	-	+	0.517	0.405
17	+	-	+	-	-	-	+	+	0.494	0.411
18	-	-	+	+	+	-	-	+	0.493	0.287
19	+	+	+	+	+	+	+	+	0.464	0.384
20	-	+	+	-	-	+	-	+	0.509	0.302
21	-	+	-	+	-	-	+	+	0.547	0.311
22	+	-	-	+	-	+	-	+	0.524	0.406
23	-	-	+	+	+	-	-	+	0.490	0.285
24	+	-	+	-	-	-	+	+	0.468	0.388

TAB. 3 – Liste des expériences du plan réduit 2^{4-1} avec la répétition $r=3$ et les résultats

Le frottement à l'état initial (0 passages) et après 180000 passages de cônes sur chacune des 8 combinaisons avec les trois répétitions sont présentés sur la figure 3.

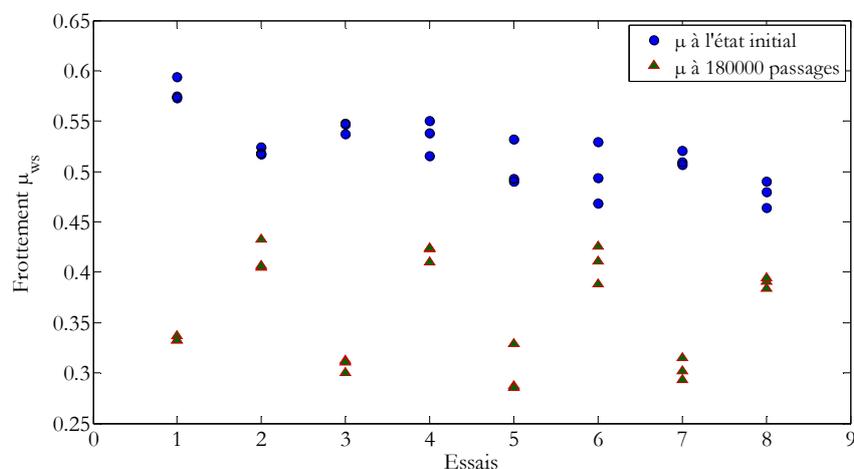


Fig. 3 – Réponses du plan d'expérience à l'état initial et à 180000 passages de cônes

Afin d'optimiser et de simplifier notre modèle décrit dans l'équation 1 par un processus d'élimination successif des facteurs et des interactions les moins significatifs, nous avons procédé de la manière suivante :

- analyse des contrastes (les valeurs des coefficients) ;
- recherche des facteurs les plus influents à l'aide du test de significativité ANOVA ;
- évaluation de la qualité du nouveau modèle par la somme des carrés résiduels.

Analyse des contrastes

L'interprétation des contrastes obéit à quelques règles simplificatrices des modèles, notamment les effets d'interactions à 3 facteurs sont négligeables.

Les contrastes sont calculés à l'aide de l'équation 2 appliquée au plan d'expérience. A titre d'exemple, le calcul de " h_1 " est donné par la relation 3 :

$$h_1 = A + BCD = \frac{1}{24} (-y_{1,r1} - y_{1,r2} - y_{1,r3} + y_{2,r1} + y_{2,r2} + y_{2,r3} + \dots + y_{8,r1} + y_{8,r2} + y_{8,r3}) \quad (3)$$

Les résultats relatifs à l'effet des facteurs étudiés et de leurs interactions, à l'état initial et après 180000 passages, sont donnés dans le tableau 4.

Effet des facteurs à l'état initial	Effet des facteurs après 180000 passages
$h_1 = A + BCD = -0.0142$	$h_1 = A + BCD = -0.0483$
$h_2 = B + ACD = -0.0042$	$h_2 = B + ACD = -0.0046$
$h_3 = C + ABD = -0.0234$	$h_3 = C + ABD = -0.0090$
$h_4 = D + ABC = -0.0098$	$h_4 = D + ABC = -0.0065$
$h_5 = AB + CD = 0.0031$: faible significativité	$h_5 = AB + CD = 0.0011$: faible significativité
$h_6 = BC + AD = 0.0012$: faible significativité	$h_6 = BC + AD = 0.0007$: faible significativité
$h_7 = AC + BD = 0.0036$: faible significativité	$h_7 = AC + BD = 0.0003$: faible significativité

TAB. 4 – Niveau de significativité des facteurs étudiés et de leurs interactions

Plus le contraste (en valeur absolue) est important, plus l'effet du facteur influe sur le frottement " μ_{ws} ". Ainsi, après 180000 passages, on peut dresser par ordre croissant les facteurs ayant le plus d'impact : PSV des granulats, épaisseur des gommages de mesure du frottement, niveau d'expérience de l'opérateur et état d'usure des gommages de polissage.

Le facteur « PSV » impacte :

- 10,5 fois plus que « l'usure des gommages de polissage »,
- 7,3 fois plus que « le niveau d'expérience de l'opérateur ».
- 5,3 fois plus que « l'usure des gommages de mesure ».

Analyse de la variance (ANOVA)

Le but de l'analyse de la variance est de tester simultanément la présence de différences significatives ou non entre plusieurs moyennes. Pour tester la significativité globale de notre modèle de régression linéaire, nous avons utilisé le test de Fisher. Le seuil de bruit choisi est de 0.05.

Analyse des résidus

Les résidus des modèles sont testés vis-à-vis de leurs distributions avec un test de

normalité (test de Shapiro) et un test d’auto-corrélation de la forme (test de Durbin-Watson). A titre d’exemple, la figure 4 montre la répartition des résidus à l’état initial.

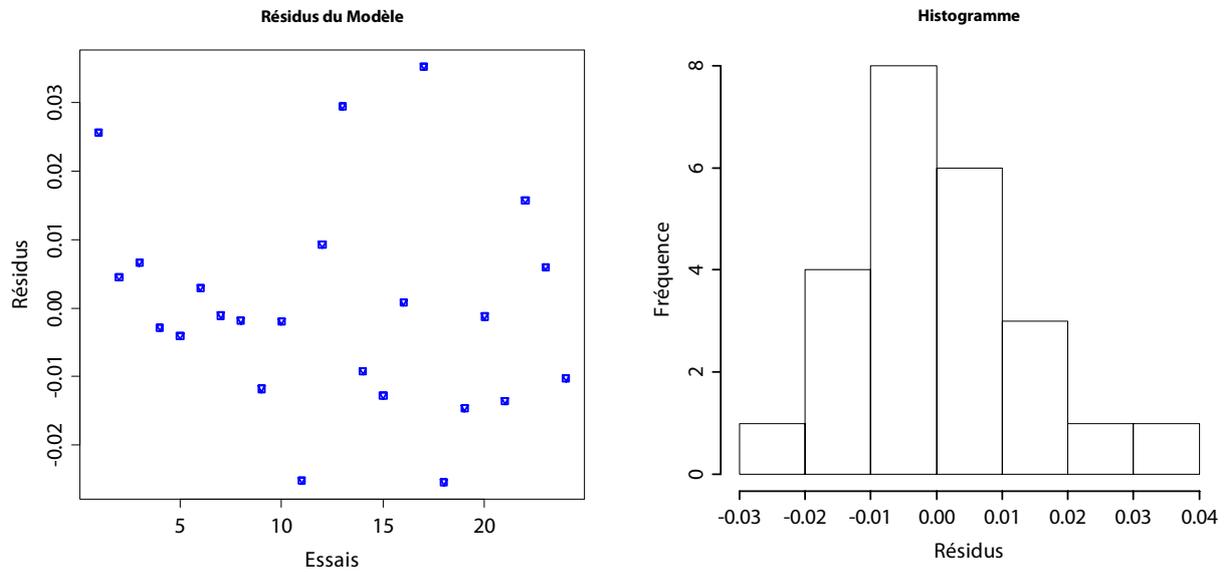


Fig. 4 – Les résidus du modèle et l’histogramme des résidus à l’état initial (0 passage)

Le graphique de nuage des points (Fig. 5) peut nous indiquer une dépendance entre les résidus. On observe clairement l’absence de corrélation, autrement dit, il n’y a aucune ligne droite qui pourrait représenter une dépendance.

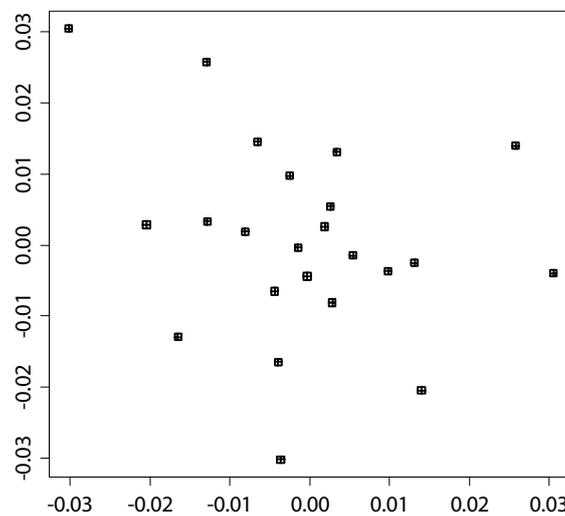


Fig. 5 – Nuage de points des résidus (n, n-1) à l’état initial (0 passage)

A la fin de ce processus, nous avons obtenu le modèle final de la prédiction du frottement en fonction des paramètres les plus significatifs (A, C et D) à l’état initial :

$$\mu_{WS_0\ passage} = 0.521 - 0.014A - 0.023C - 0.009D \tag{4}$$

Les résidus obtenus sont les suivants :

- Le test de normalité de Shapiro : $Valeur_s = 0.266 >$ seuil choisi qui est de 0.05, les résidus suivent bien une loi normale ;
- Le test d'indépendance de Durbin-Watson : $Valeur_{DW} = 0.758 >$ seuil choisi qui est de 0.05, les résidus sont indépendants.

La même démarche est appliquée après 180000 passages de cônes de polissage, le modèle obtenu est donné par la relation 5 :

$$\mu_{WS_180000\ passages} = 0.3596 - 0.0483A - 0.009C - 0.006D \quad (5)$$

Le modèle est validé (les résidus suivent la loi normale et ils sont indépendants) et tous les paramètres sont significatifs.

Les deux modèles ne dépendent pas du facteur B (l'état des cônes de polissage), en revanche, le facteur A (la nature des granulats) est le plus significatif. De plus, les facteurs sont indépendants, parce que toutes les interactions sont négligeables.

Calcul de l'incertitude-type composée et de l'incertitude élargie

Nous supposons que la loi reliant la grandeur à mesurer G et les variables d'entrée G_i est de la forme :

$$G = f(G_1, \dots, G_n)$$

L'incertitude-type composée $u_c(G)$ associée à la mesure de G fait donc intervenir les incertitudes $u_c(G_i)$ associées à la mesure de chaque grandeur G_i suivant la loi de propagation des incertitudes de Gauss-Laplace :

$$u_c(G) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial G_1}\right)^2 u^2(G_1) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial G_n}\right)^2 u^2(G_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial G_i} \frac{\partial f}{\partial G_j} u(G_i) u(G_j)}$$

L'hypothèse de non corrélation des variables d'entrée ayant été vérifiée, cette loi prend la forme simplifiée suivante :

$$u_c(G) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial G_i}\right)^2 u^2(G_i)}$$

Les estimations des valeurs des coefficients de sensibilité $\frac{\partial f}{\partial G_i}$ sont données par les coefficients des modèles (4) et (5).

Seuls les facteurs C « épaisseur de gomme des patins de mesure » et D « niveau d'expérience de l'opérateur » sont pris en compte car, d'une part, le facteur A « performance des granulats PSV » représente la caractéristique que l'essai doit permettre de déterminer et, d'autre part, nous avons montré que les deux modèles ne dépendent pas du facteur B « état d'usure de gomme des cônes de polissage ».

Le facteur C « épaisseur de gomme des patins de mesure » est supposé suivre une loi de distribution uniforme sur l'intervalle [0,1] soit une variance $u^2(G_1) = \frac{1}{3}$ et le facteur D « niveau d'expérience de l'opérateur » une loi de distribution triangulaire $\pm 0,5$ soit une variance $u^2(G_2) = \frac{1}{6}$

En tenant compte des variances résiduelles $VAR(\varepsilon)$ des modèles (4) et (5), les estimations de l'incertitude-type composée obtenues sont les suivantes :

Etat initial :

$$u_c = \sqrt{(-0,023)^2 \cdot \frac{1}{3} + (-0,009)^2 \cdot \frac{1}{6} + VAR(\varepsilon)} = 0,021$$

180000 passages :

$$u_c = \sqrt{(-0,009)^2 \cdot \frac{1}{3} + (-0,006)^2 \cdot \frac{1}{6} + VAR(\varepsilon)} = 0,014$$

Avec un facteur d'élargissement $k=2$ les incertitudes élargies $U=k.u_c$ pour un essai individuel ont donc pour valeurs :

Etat initial : $U = 0,04$

180 000 passages : $U = 0,03$

Conclusion

Ce papier présente une méthodologie d'évaluation de l'incertitude de mesure du coefficient de frottement mesuré à l'aide de la machine Wehner et Schulze. Cette méthodologie nous a permis de proposer un modèle, issu de l'analyse des résultats d'un plan d'expérience, qui donne l'évolution du frottement en fonction des paramètres les plus significatifs qui sont la résistance au polissage des granulats (PSV), l'usure des gommages de mesure du frottement et enfin le niveau de l'expérience de l'opérateur. L'équation établie montre que l'effet de l'usure des gommages de polissage est négligeable ainsi que les interactions de deuxième ordre.

En outre, cette approche confirme que cet essai est adapté à la caractérisation des surfaces routières vis-à-vis de la résistance au polissage. En effet, l'impact du PSV est 7,3 fois plus important que le niveau d'expérience de l'opérateur et il est 5,3 fois plus que l'usure des gommages de mesure.

L'incertitude élargie, calculée après 180000 passages de cônes, est de l'ordre de 0,03. Elle est en effet équivalente à la répétabilité de la machine Wehner et Schulze obtenue lors de la campagne d'essai inter-laboratoires réalisée en 2010 [1].

Références

- [1] Hamlat.S, Marsac.P, Min Tan Do, Ivan Drouadaine. Évaluation de la résistance au polissage des matériaux de chaussées avec la machine Wehner et Schulze « Campagne d'essai inter-laboratoires ». RGRA n° 885-juin 2010.
- [2] Iooss. B. Analyses d'incertitudes et de sensibilité de modèles complexes - Applications dans des problèmes d'ingénierie. CEA Cadarache, rencontres « Maths-Météo » Toulouse, mars 2009.
- [3] Lebrun. R. Propagation probabiliste d'incertitudes pour la normalisation et la certification. EADS Innovation Works, 2009.
- [4] Rocquigny. E. La maîtrise des incertitudes dans un contexte industriel. 2nde partie : revue des méthodes de modélisation statistique physique et numérique. Journal de la Société française de statistique. 2006, vol. 147, no3, pp. 73-106.
- [5] Hamlat. S, Conde. T. M, Marion. P, Hammoum. P, Moreira. S. Effets de la pétrographie des granulats sur la résistance au polissage. Conférence internationale francophone de tribologie_ Modélisation du contact et de l'usure, Albi-Mai 2010 (Publié dans les ouvrages JIFT2010 édité par les presses Polytechniques et Universitaires Romandes)
- [6] Senga. Y, Dony. A, Colin. J, Hamlat. S, Berthaud. Y. Impact de l'hétérogénéité des granulats sur la performance des enrobés recyclés. 29ème rencontre de l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC) du 28 mai au 1 juin 2011, Tlemcen. (Publié dans les Annales du BTP août-octobre 2011 N° 4-5).
- [7] NF EN 1097-8. Essais sur les propriétés mécaniques et physiques des granulats. Partie 8. Détermination du coefficient de polissage accéléré, mars 2000.
- [8] NF EN 13036-4 Mars 2004 _ Caractéristiques des routes et aérodromes - Méthodes d'essai - Partie 4 : méthode de mesurage de l'adhérence d'une surface - Essai au pendule.
- [9] prEN 12697-49 : Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 49: Determination of the laboratory skid resistance after polishing (Wehner-Schulze-Apparatus)