

# Étude des incertitudes de mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussées aéronautiques

## Rapport d'étude





MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE  
ET DE L'ÉNERGIE

*Direction générale de l'aviation civile*

*Service technique de l'aviation civile*

*Département Infrastructures Aéroportuaires*

# Etude des incertitudes de mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussées aéronautiques

---

Version **v1 du 08/07/13**

---

Rédacteur : **Jonathan GERTHOFFERT**, chargé de programmes

---

Référence : RAP/STAC/IA/DER/**13-322**

---



## **SOMMAIRE**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>8</b>
1.1.	OBJET DU DOCUMENT .....	8
1.2.	GUIDE DE LECTURE .....	8
<b>2.</b>	<b>DOCUMENTATION ET REFERENCES .....</b>	<b>8</b>
2.1.	REFERENCES DOCUMENTAIRES .....	8
2.2.	DEFINITIONS.....	9
<b>3.</b>	<b>METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....</b>	<b>10</b>
3.1.	ANALYSE DU PROBLEME .....	10
3.2.	HYPOTHESES .....	10
3.3.	APPROCHE METHODOLOGIQUE .....	12
<b>4.</b>	<b>LE CALCUL DU RESULTAT DE MESURE .....</b>	<b>12</b>
4.1.	LA DEFINITION DU MESURANDE.....	12
4.2.	L'ANALYSE DU PROCESSUS DE MESURE.....	12
4.3.	SOURCES D'ERREURS NEGLIGEABLES .....	16
4.4.	LE MODELE MATHEMATIQUE DU PROCESSUS DE MESURE .....	17
<b>5.</b>	<b>ETUDES DES INCERTITUDES TYPES LIEES A L'ETALONNAGE .....</b>	<b>17</b>
5.1.	PRINCIPE DE L'ETALONNAGE EN STATIQUE DES CHAINES DE MESURE .....	17
5.2.	INCERTITUDES DE L'ETALONNAGE.....	21
5.3.	ANALYSE DES FACTEURS INFLUENTS .....	24
<b>6.</b>	<b>INCERTITUDES LIEES A L'UTILISATION DU SYSTEME DE MESURE .....</b>	<b>25</b>
6.1.	PRESENTATION DES CAMPAGNES EXPERIMENTALES .....	26
6.2.	RESULTATS DES CAMPAGNES EXPERIMENTALES .....	29
6.3.	LES INCERTITUDES TYPES DU SYSTEME DE MESURE .....	33
6.4.	DETERMINATION DE L'INCERTITUDE COMPOSEE .....	33
6.5.	DETERMINATION DE L'INCERTITUDE ELARGIE .....	33
6.6.	ANALYSE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES D'ESSAI.....	34
<b>7.</b>	<b>SYNTHESE DES RESULTATS DE L'ETUDE .....</b>	<b>34</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : Diagramme des 5M pour la mesure du coefficient de frottement au moyen de la remorque IMAG .....	15
Figure 2 : Etalonnage de la chaîne de mesure de la force verticale .....	18
Figure 3 : Banc mécanique de traction pour le raccordement de la force horizontale .....	18
Figure 4 : Instrumentation du banc de traction.....	19
Figure 5 : Appareil de mesure en position face au banc d'étalonnage .....	19
Figure 6 : Etalonnage en traction de la roue de mesure .....	20
Figure 7 : Schéma représentant le processus de vérification des chaînes de mesure de l'IMAG .....	20
Figure 9 : Poids relatif de $F_h$ et $F_v$ dans l'incertitude total de l'étalonnage et de l'utilisation de la chaîne de mesure du CFL pour différents niveaux de CFL .....	24
Figure 10 : Poids des différentes sources d'incertitudes dans l'incertitude totale liée à l'étalonnage et à l'utilisation de la chaîne de force verticale $F_v$ .....	25
Figure 11 : Poids des différentes sources d'incertitudes dans l'incertitude totale liée à l'étalonnage de la chaîne de force horizontale $F_h$ .....	25
Figure 12 : Photographie aérienne de la piste d'essai de l'IFSTTAR .....	27
Figure 13 : Disposition des surfaces d'essais .....	28
Figure 14 : Photographies de quatre surfaces .....	29
Figure 15 : Poids relatif de différentes sources d'incertitudes dans l'incertitude totale .....	34

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Lois de distribution des variables aléatoires utilisées usuellement pour le calcul d'incertitude (a désigne la demi-étendue des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées au mesurande)...	11
Tableau 2 : Incertitudes types associées au raccordement de la chaîne de mesure de la force verticale $F_v$ de l'appareil de mesure .....	21
Tableau 3 : Incertitudes types associées au raccordement de la chaîne de mesure de la force verticale $F_h$ de l'appareil de mesure .....	22
Tableau 4 : Paramètres du plan d'expérience.....	27
Tableau 5 : Matériaux composant les couches de roulements des surfaces de la piste d'essai.....	28
Tableau 6 : Résultats des campagnes expérimentales.....	30
Tableau 7 : Calcul des incertitudes types pour les paramètres étudiés à 95 km/h .....	33
Tableau 8 : Synthèse des recommandations normatives pour les différents types de pneumatiques d'essais .....	35
Tableau 9 : Tolérances acceptables sur les paramètres d'essais pour la réalisation des essais d'adhérence .....	35

## Résumé Exécutif

L'estimation des incertitudes de la mesure est un travail essentiel afin de pouvoir juger de la fiabilité de la mesure et d'être capable de comparer des résultats entre eux ou par rapport à des valeurs de référence. Le STAC dispose depuis plusieurs années de deux appareils, de type IMAG, de mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussures aéronautiques. Ces appareils ont déjà prouvé leur répétabilité et leur reproductibilité. Afin d'améliorer la qualité de leurs prestations, il était nécessaire d'étudier et de quantifier l'incertitude de la mesure de l'adhérence fonctionnelle et ses différentes composantes.

L'évaluation des incertitudes de mesure a été réalisée conformément aux recommandations du GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure). La méthodologie appliquée est décomposée en quatre étapes : 1/ Calcul du résultat de mesure 2/ Evaluation des incertitudes types 3/ Détermination de l'incertitude composée 4/ Calcul de l'incertitude élargie. Faute de disposer d'une modélisation physique, une approche expérimentale a été retenue pour cette étude.

Trois valeurs de l'incertitude élargie ont été obtenues, correspondant à chacune des vitesses d'essai. Le poids relatif de chacun des facteurs d'influence dans l'incertitude globale a été étudié afin de déterminer les meilleurs choix et les voies à développer pour fiabiliser le résultat de la mesure.

### Mots-clés

Incertitude de mesure, IMAG, adhérence fonctionnelle, coefficient de frottement longitudinal

## Préambule

Le contenu de ce rapport a été établi par le service technique de l'Aviation civile avec ses moyens de mesures, ses outils, ses procédures et ses opérateurs. Bien que les conclusions aient une portée générale, le lecteur est averti que le détail des résultats pourrait être différent dans d'autres conditions.

La reproduction de cette étude, en tout ou partie, est autorisée à condition que cet avertissement soit clairement et visiblement attaché à la reproduction.

## 1. Introduction

### 1.1. *Objet du document*

L'estimation des incertitudes de la mesure est un travail essentiel afin de pouvoir juger de la fiabilité de la mesure et d'être capable de comparer des résultats entre eux ou par rapport à des valeurs de référence. Le STAC dispose depuis plusieurs années de deux appareils, de type IMAG, de mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussures aéronautiques. Ces appareils ont déjà prouvé leur répétabilité et leur reproductibilité, à travers différentes campagnes d'essai d'inter-comparaison, notamment internationale.

Afin fiabiliser les résultats de mesure, il était nécessaire d'étudier et de quantifier l'incertitude de la mesure de l'adhérence fonctionnelle et ses différentes composantes. L'évaluation des incertitudes de mesure a été réalisée conformément aux recommandations du GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, ref. 1). La méthodologie appliquée est décomposée en quatre étapes : 1/ Calcul du résultat de mesure 2/ Evaluation des incertitudes types 3/ Détermination de l'incertitude composée 4/ Calcul de l'incertitude élargie. Faute de disposer d'une modélisation physique, une approche expérimentale a été retenue pour cette étude. Les résultats de cette étude ont permis de déterminer les valeurs de l'incertitude élargie applicable aux mesures réalisés par le STAC. Ces valeurs semblent tout à fait raisonnables compte-tenu de la complexité du système de mesure. L'analyse des résultats ouvrent des voies pour maîtriser et réduire les incertitudes de mesure.

Ce rapport présente les principaux résultats de cette étude et présente des moyens pour maîtriser et réduire les incertitudes de mesure de l'adhérence fonctionnelle.

### 1.2. *Guide de lecture*

Ce document a pour objectif de sensibiliser les opérateurs d'essai, prestataires de services et exploitants d'aéroports aux incertitudes de la mesure du coefficient de frottement longitudinal. Il propose une démarche expérimentale pour déterminer ces incertitudes et est une application pratique des recommandations du GUM. Finalement, il utilise ce travail pour chercher à fiabiliser ce type de mesures.

La démarche du calcul d'incertitude est au moins aussi importante que le résultat. Ce résultat n'est pas applicable de manière générale à tous les appareils : il dépend de la formation des opérateurs d'essai, des procédures d'essai, du type d'appareil... Pour ces raisons, ce document ne présente pas de résultats chiffrés des incertitudes de mesure.

## 2. Documentation et références

### 2.1. *Références documentaires*

Cette étude a été réalisée à partir des documents et références suivantes :

1. JCGM, Guide pour l'expression des incertitudes de mesure (NF ENV 13005)
2. JCGM, Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)
3. Ishikawa, K. (1990). Introduction to Quality Control. 448 p.

4. Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), Annexe 14 relative à l'exploitation technique des aéroports
5. Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), Manuel des Services d'Aéroports, 2e Partie, Etats de surface de la chaussée
6. Service technique de l'Aviation Civile, IMAG - Instrument de mesure automatique de glissance, STAC - 2012 - A4 - 4 pages
7. Association Internationale Permanente des Congrès de la Route, Spécifications d'un pneu d'essai standard pour la mesure d'un coefficient de frottement d'une surface de chaussée : le pneu lisse
8. ASTM E670 - 09 Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter
9. ASTM E1551 - 08 Standard Specification for Special Purpose, Smooth-Tread Tire, Operated on Fixed Braking Slip Continuous Friction Measuring Equipment

## 2.2. Définitions

Ce document fait appel aussi bien à des notions de métrologie qu'à des concepts techniques relatifs aux chaussées et à leurs caractéristiques de surface. Les définitions suivantes sont importantes pour la compréhension du document :

**Film d'eau théorique** : L'essai normalisé d'adhérence fonctionnelle est réalisé en appliquant devant la roue de mesure un film d'eau d'une épaisseur théorique de 1 mm.

**Incertitude de mesure** : Paramètre non négatif, noté  $u$ , qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées.

**Incertitudes élargies** : L'incertitude élargie, notée  $U$ , est la grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on peut s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande. L'intervalle généralement retenu correspond à un niveau de confiance de 95 %.

**Mesurande** : Grandeur que l'on veut mesurer.

**Pneumatique d'essai** : Pneumatique normalisé à bande de roulement lisse, dédié spécifiquement à la mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussées.

**Répétabilité** : Différence maximale attendue entre deux mesures réalisées par la même machine, avec le même pneumatique d'essai, opérées par les mêmes opérateurs, sur une même section de chaussée et dans un intervalle de temps court, avec une probabilité de 95 %.

**Reproductibilité** : Différence maximale attendue entre deux mesures réalisées par deux machines différentes, avec deux pneumatiques d'essai différents, exécutées par deux opérateurs différents, sur une même section de chaussée et dans un intervalle de temps court, avec une probabilité de 95 %.

**Taux de glissement** : Le taux de glissement est la différence relative entre la vitesse d'avancement du véhicule et la vitesse de la roue de mesure.

**Traçabilité métrologique :** Propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnages dont chacun contribue à l'incertitude de mesure.

**Valeur mesurée :** Valeur d'une grandeur représentant un résultat de mesure

**Vérification des chaînes de mesure :** Preuves, par étalonnages, que les exigences spécifiées ont été satisfaites. Dans le cadre de la gestion d'un parc d'instruments de mesure, la vérification permet de s'assurer que les écarts entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée sont tous inférieurs aux erreurs maximales tolérées, définies par une norme, par une réglementation ou une prescription propre au gestionnaire du parc d'instruments de mesure. Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de remise en service, d'ajustage, de réparation, de déclassement ou de réforme. Dans tous les cas, une trace écrite de la vérification effectuée doit être conservée dans le dossier individuel de l'appareil de mesure.

### **3. Méthodologie de l'étude**

#### ***3.1. Analyse du problème***

Au sens métrologique, un résultat de mesure est l'ensemble de valeurs attribuées à un mesurande, complété par toute autre information pertinente disponible. Cela peut s'exprimer sous la forme d'une fonction de densité de probabilité, ou plus généralement, sous la forme d'une valeur mesurée unique et d'une incertitude de mesure.

L'objet de cette étude est donc de proposer une démarche permettant d'évaluer l'incertitude de la mesure du coefficient de frottement longitudinal.

#### ***3.2. Hypothèses***

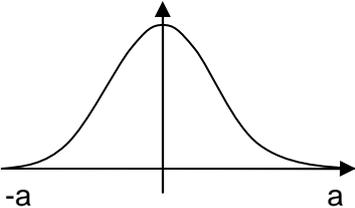
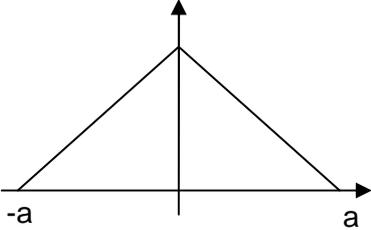
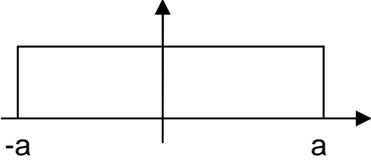
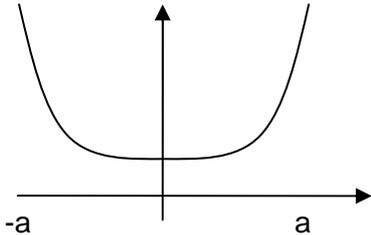
Les incertitudes sont des variables aléatoires qui suivent des lois de distribution.

Dans la plupart des cas, la meilleure estimation disponible de l'incertitude est la variance expérimentale calculée sur  $n$  observations indépendantes. C'est l'évaluation de type A.

Lorsqu'il n'est pas possible de disposer de variance expérimentale, il est possible d'apprécier l'incertitude type en déterminant, pour la composante dont on calcule l'incertitude, l'étendue des valeurs possibles et en choisissant la loi de distribution la plus adaptée. C'est l'évaluation de type B.

Les lois de distribution les plus courantes sont présentées dans la figure ci-après :

**Tableau 1 : Lois de distribution des variables aléatoires utilisées usuellement pour le calcul d'incertitude (a désigne la demi-étendue des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées au mesurande)**

Lois de probabilités	Représentation graphique	Ecart-type
Loi normale		$\frac{a}{3}$
Loi triangle isocèle		$\frac{a}{\sqrt{6}}$
Loi uniforme		$\frac{a}{\sqrt{3}}$
Loi dérivée d'arc sinus		$\frac{a}{\sqrt{2}}$

Le choix de la loi de distribution est fondé sur toutes les observations et informations disponibles au sujet de la variabilité possible de la composante étudiée :

- Les résultats de mesures antérieures,
- L'expérience ou la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés,
- Les spécifications du fabricant,
- Les données issues des certificats d'étalonnage ou autres certificats,
- L'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant d'ouvrages et manuels.

Lorsque la loi de distribution n'est pas connue a priori, ou qu'aucune raison ne permet de la déterminer, la loi uniforme est généralement retenue car elle maximise l'incertitude.

Dans cette étude, lorsque la loi de distribution n'était pas connue a priori, le choix s'est systématiquement porté sur une loi de distribution uniforme.

### **3.3. Approche méthodologique**

Le résultat de la mesure d'un appareil de mesure du frottement dépend aussi bien de l'appareil que de l'environnement qui l'entoure : le pneumatique, le mode opératoire, la maintenance, l'étalonnage, l'environnement, l'opérateur... L'étude ne s'est donc pas focalisée sur l'instrument de mesure, mais s'est intéressée à l'ensemble du processus qui conduit à l'obtention du résultat de la mesure. C'est l'étape 1, appelé « Analyse du processus de mesure ». A l'issue de cette dernière étape, une liste de paramètres à étudier est établie et un modèle mathématique du processus de mesure est proposé.

L'étape 2 consiste à déterminer les incertitudes types des différents paramètres, soit par une démarche expérimentale, soit à partir des informations et connaissances réunies sur ces paramètres. L'application de la loi de propagation des incertitudes permet de calculer l'incertitude composée, puis l'incertitude élargie.

Finalement, les résultats sont analysés de façon à déterminer les facteurs influant sur le résultat de la mesure et des pistes sont proposées pour réduire l'incertitude de la mesure.

## **4. Le calcul du résultat de mesure**

### **4.1. La définition du mesurande**

Le mesurande considéré est la valeur du coefficient de frottement longitudinal, moyennée sur une distance significative (généralement 100 m), mesurée à l'aide de l'IMAG à une vitesse donnée (40, 65 ou 95 km/h) avec un taux de glissement de la roue de mesure de 15 % et un débit correspondant à un film d'eau d'une épaisseur théorique de 1 mm.

Le mesurande est appelé CFL dans la suite de ce document.

### **4.2. L'analyse du processus de mesure**

L'analyse du processus de mesure repose sur la connaissance du système de mesure par ses utilisateurs. Les facteurs influant sur la mesure du CFL sont listés et classés selon la méthode d'Ishikawa (ref. 3), ou méthode des 5M (Machine, Main d'œuvre, Matériaux, Méthode, Milieu).

#### **4.2.1. Machine**

Le terme « machine » regroupe les moyens de mesure et l'étalon utilisé. Les éléments suivants ont été recensés comme ayant potentiellement une influence sur la mesure :

- Etalonnage des chaînes de mesure
- Tension de la courroie : la tension de la courroie d'entraînement de la roue de mesure aura une influence sur la valeur du taux de glissement.
- Pression amortisseur roue de mesure : la pression des amortisseurs de la roue de mesure joue sur la mesure de la force verticale.
- Pression amortisseurs roues porteuses : les amortisseurs des roues porteuses sont importants pour protéger la machine des chocs.
- Goulotte : la goulotte permet d'assurer le dépôt d'une épaisseur d'eau théorique de 1,0 mm sur la chaussée, devant la roue de mesure. Selon le volume d'eau contenu dans la cuve, la hauteur du véhicule et de la goulotte varient. Le point d'impact du jet d'eau sur la chaussée se trouve donc

modifié, et potentiellement l'épaisseur d'eau devant la roue de mesure est différente du millimètre théorique.

- Assiette (évolution durant essai) : L'assiette du véhicule varie pendant l'essai, à cause de la variation de la quantité d'eau dans la cuve. Cette variation modifie l'alignement de l'IMAG sur le véhicule tracteur. En particulier, la position du châssis de l'IMAG ne sera plus parfaitement horizontale, ce qui créera une erreur sur la mesure des capteurs de force horizontale.
- Salissure du pneumatique : La présence de salissure sur le pneumatique modifie la nature du contact entre ce dernier et la chaussée et fausse la mesure.
- Véhicule tracteur : L'état du véhicule tracteur doit garantir l'accélération, le freinage et le maintien de la vitesse d'essai corrects.
- Transport de la machine : L'IMAG doit être transporté du laboratoire vers le site d'essai. Cette opération peut causer l'endommagement de l'IMAG (accident...) ou son dérèglement (chocs, vibrations...).

#### 4.2.2. Main d'œuvre

La catégorie « main d'œuvre » comprend toutes les erreurs commises par les opérateurs.

- Opérateur d'essai : L'opérateur est responsable du déclenchement du mouillage artificiel, du freinage de la roue de mesure, et de l'acquisition. Il est également responsable de la surveillance des paramètres d'essai et est garant de la validité de la mesure.
- Conducteur : Le conducteur est responsable de l'accélération et du freinage du véhicule. Il doit garantir la stabilité de la vitesse d'essai et la stabilité de la trajectoire.
- Rédacteur du rapport : Le rédacteur du rapport d'essai est responsable de l'exploitation et de l'analyse des mesures. Il est assisté par un vérificateur, expert sur l'adhérence fonctionnelle des chaussées aéronautiques.

#### 4.2.3. Matériaux

Le terme « matériaux » comprend toutes les erreurs dues à l'incertitude relatives aux propriétés des matériaux :

- Pneumatique d'essai (fabrication, évolution de la température durant l'essai, vieillissement) : Le pneumatique est probablement l'élément le plus important du système de mesure car c'est l'élément qui est en contact avec la chaussée. C'est véritablement le « capteur » de l'IMAG.
- Etat des surfaces d'essai : L'hétérogénéité latérale ou longitudinale de l'état de surface a une influence sur la valeur moyenne du CFL car la trajectoire n'est pas toujours parfaitement parallèle à l'axe central de la piste et le point de départ (PM 0) n'est pas parfaitement identifié (au mètre près).

#### 4.2.4. Méthode

La catégorie « méthode » comprend toutes les erreurs liées à la mise en œuvre de la méthode d'essai :

- Mise en œuvre du matériel (assise équipement, hauteur de la goulotte) : L'équipement doit être réglé pour que le châssis de l'IMAG soit horizontalement aligné avec le système d'attelage du véhicule tracteur. La goulotte est réglée à une hauteur de 75 mm par rapport au sol.
- Pression des pneumatiques (roues porteuses et roue de mesure) : La pression des roues porteuses est réglée à 2,5 bars et celle de la roue de mesure est réglée à 1,5 bar. Il y a une incertitude sur la valeur réelle de la pression liée au manomètre, à la température...
- Vitesse ( $\pm 5$  km/h) : La vitesse d'essai doit être aussi stable que possible. Une variation maximale de 5 km/h autour de la valeur cible est autorisée.
- Hauteur du film d'eau ( $\pm 10$  %) : Le débit du système de mouillage artificiel est asservi à la vitesse. Une variation maximale de 10 % autour de la valeur cible est autorisée.
- Taux de glissement : La valeur cible du taux de glissement de la roue de mesure est de 15 %. Il doit être aussi stable que possible, mais varie en raison du système d'asservissement, de la force de frottement, de l'uni de la piste...
- Trajectoire : La trajectoire du véhicule doit être parallèle à l'axe central de la piste.
- PM 0 : PM 0 désigne le point de départ. Si ce point n'est pas bien identifié, l'analyse des résultats sera faussée.

#### 4.2.5. Milieu

Le terme « milieu » comprend toutes les erreurs dues à l'environnement entourant l'essai :

- Température (sol, air, pneu) : Il est connu que la valeur du coefficient de frottement dépend de la température de la chaussée et de celle du pneumatique. En particulier, le module d'Young du caoutchouc augmente linéairement avec la température.
- Vent latéral : Le vent latéral peut avoir un effet sur le maintien de la trajectoire et sur le jet d'eau.
- Appréciation humidité surface : L'essai doit être réalisé sur une chaussée sèche.
- Visibilité : La visibilité est importante pour assurer le maintien de la trajectoire.

#### 4.2.6. Conclusion

Les erreurs listées ci-dessus sont résumées dans la figure ci-après :

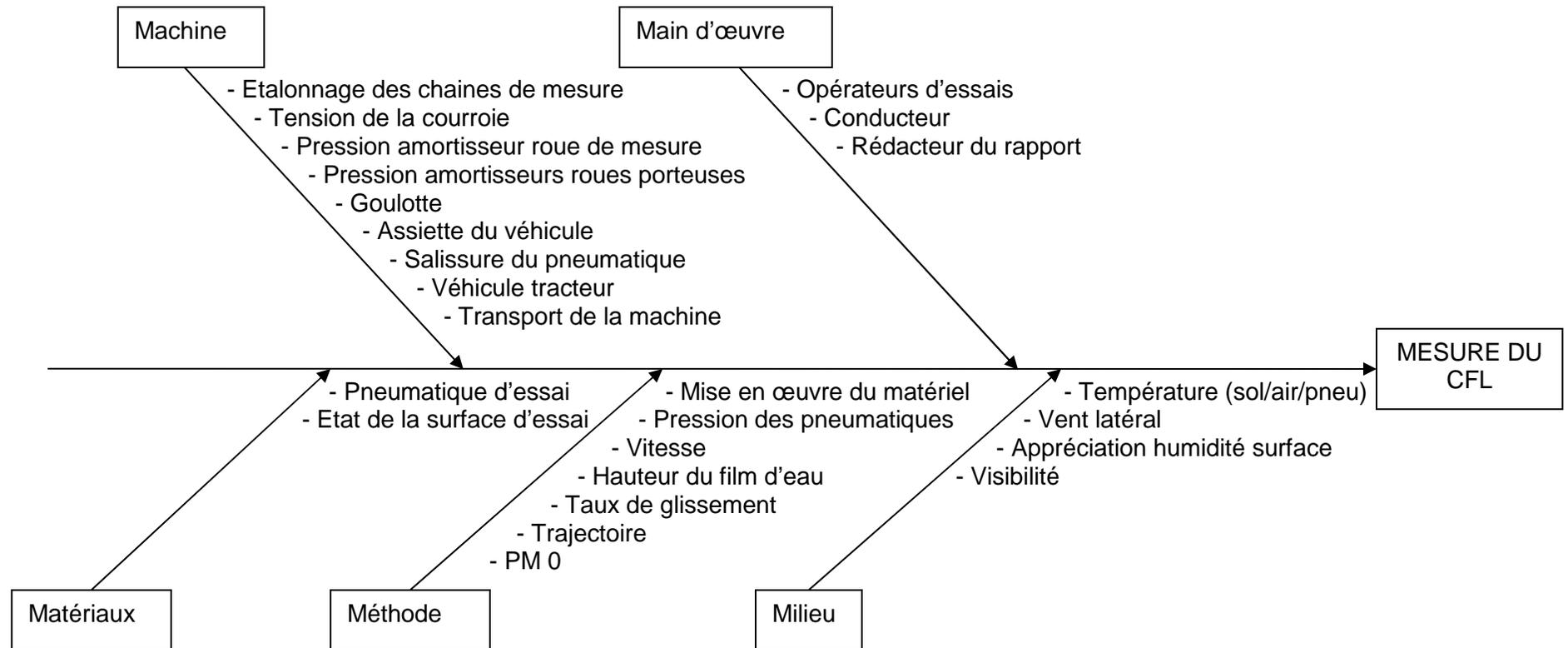


Figure 1 : Diagramme des 5M pour la mesure du coefficient de frottement au moyen de la remorque IMAG

### **4.3. Sources d'erreurs négligeables**

Des procédures et une maintenance adaptée permettent de réduire la liste des sources d'incertitudes. Ainsi, les paramètres suivants n'ont pas d'influence significative :

- Pression amortisseur roues porteuses : Les amortisseurs des roues porteuses protègent l'IMAG mais n'ont pas d'influence directement sur la mesure. De plus, lors de la maintenance de l'IMAG, l'état des amortisseurs des roues porteuses est vérifié et il n'a encore jamais été observé de variation de pression de l'amortisseur.
- Salissure du pneumatique : Un contrôle visuel du pneumatique de mesure est réalisé par le contrôleur technique avant chaque essai pour repérer l'éventuelle présence d'un polluant (huile, etc.) ou d'un objet intrusif et l'éliminer.
- Véhicule tracteur : Le véhicule tracteur a été choisi en fonction de ses caractéristiques (puissance, hauteur, largeur, etc.) afin de permettre 1/ d'atteindre en un minimum de distance (éviter perte excessive de longueur de piste) les vitesses de mesures de 65 et 95 km/h, 2/ le maintien et la stabilité de la vitesse d'essai, 3/ la décélération sur de courtes distances. Il est entretenu régulièrement par l'atelier mécanique du STAC en suivant les préconisations du constructeur (vidange, pression des pneus,...). Un contrôle des organes principaux est réalisé périodiquement par le constructeur. Enfin, un contrôle technique est réalisé tous les deux ans.
- Transport de la machine : 1/ Le transport et la manutention de l'IMAG sont réalisés conformément aux procédures d'exécution dédiées établies par le STAC. 2/ Le capot de l'IMAG est équipé d'un verrouillage qui empêche toute intervention extérieure non-désirée sur le système de mesures. 3/ La remorque transportant l'IMAG est dotée d'un système d'amortissement diminuant les risques potentiels de secousses lors du transport. Cette dernière est entretenue périodiquement par l'atelier mécanique du STAC. 4/ Un contrôle des chaînes de mesure de l'IMAG est réalisé avant et après les essais (en laboratoire) pour s'assurer qu'elles n'ont subi aucun dommage pendant le transport. Si tel était le cas, une nouvelle campagne de mesures serait reprogrammée après remise en état de l'appareil. 5/ Un contrôle de l'état de l'IMAG est réalisé sur le lieu de l'essai
- Rédacteur du rapport : 1/ Le personnel rédigeant le rapport d'essai est qualifié selon une procédure dédiée. 2/ Le rapport est soumis à la procédure qualité STAC (vérification et approbation). 3/ Le rédacteur s'appuie sur un rapport type pour rédiger son rapport.
- Compétences des agents exécutant les essais : La qualification et la confirmation de la qualification du personnel exécutant les essais sont établies selon une procédure dédiée.
- Traçabilité du mesurage par un agent : Les instruments de mesure sont gérés et suivis via un logiciel spécifique (OPTIMU).
- PM 0 : Le personnel est conscient de l'importance de l'identification précise de ce point.
- Paramètres météo (appréciation de l'humidité de la surface, de la visibilité) : Les essais sont réalisés par temps sec et sur piste sèche. En cas de présence d'eau sur la chaussée ou la piste d'essai, les essais sont reportés à une date ultérieure ou annulés.

#### **4.4. Le modèle mathématique du processus de mesure**

Il n'existe pas de modèle physique caractérisant la relation existant entre le CFL et les différents paramètres listés en 3.1. L'effet de chaque facteur sur la mesure d'adhérence fonctionnelle a donc été étudié expérimentalement.

La formule décrivant le processus de mesure est :

$$CFL = CFL_m + \sum_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

Où CFL représente la valeur corrigée,  $CFL_m$  représente la valeur mesurée et les  $C_i$  représentent les corrections dues aux différents facteurs.

Au regard de l'analyse des parties 4.2 et 4.3, on considère les termes correctifs suivants :

- $C_j$  = correction de justesse due à l'étalonnage de la chaîne de mesure
- $C_{\text{état pneu}}$  = correction due à l'état d'usure du pneumatique
- $C_{\text{pression}}$  = correction due à la pression du pneumatique
- $C_{\text{hauteur d'eau}}$  = correction due à la hauteur d'eau
- $C_{\text{goulotte}}$  = correction due à la variation de la hauteur de la goulotte
- $C_{\text{assiette}}$  = correction due la variation de l'assiette du véhicule
- $C_{\text{taux de glissement}}$  = correction due au taux de glissement
- $C_{\text{vitesse}}$  = correction due à la vitesse

### **5. Etudes des incertitudes types liées à l'étalonnage**

Toutes les chaînes de mesure de l'IMAG, mesure de la force horizontale et mesure de la force verticale, sont étalonnées selon le même principe. Elles sont raccordées à des capteurs de référence, reliés au système international. L'étalonnage des capteurs de référence est appelé étalonnage externe, car il n'est pas réalisé au STAC. Le raccordement des chaînes de mesure aux capteurs de référence est appelé étalonnage interne. La traçabilité métrologique, telle que définies au paragraphe 2.2, est donc assurée.

#### **5.1. Principe de l'étalonnage en statique des chaînes de mesure**

La détermination de la force verticale  $F_v$  est réalisée au moyen d'une balance étalon encastrée. La méthode consiste à comparer la réponse de la chaîne de mesure de la force verticale à la réponse de la balance (Figure 2). Ce processus est réalisé sur une étendue de force verticale couvrant toute l'étendue des valeurs mesurées lors de l'essai d'adhérence fonctionnelle.

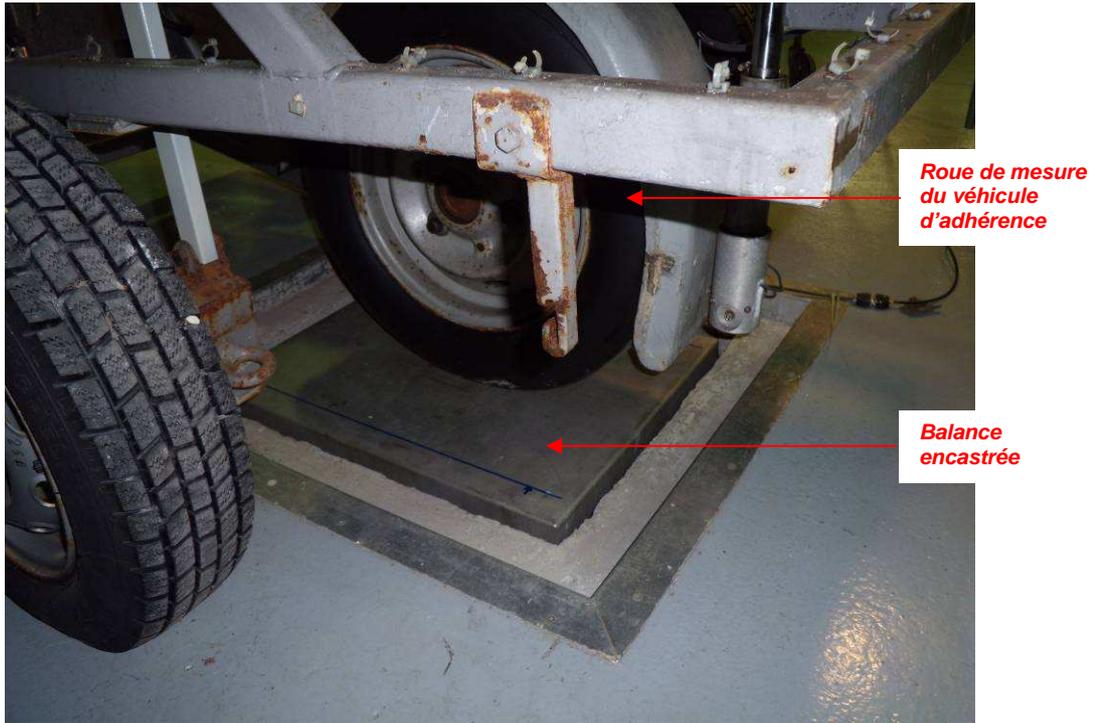


Figure 2 : Etalonnage de la chaîne de mesure de la force verticale

La détermination de la force horizontale  $F_h$  est réalisée au moyen d'un banc mécanique fonctionnant en traction (Figure 3) associé à une chaîne de mesure composée d'un capteur de force étalon et d'un pont de mesure. Les Figures 5 à 8 illustrent les différentes étapes du raccordement de la chaîne de mesure de la force horizontale.

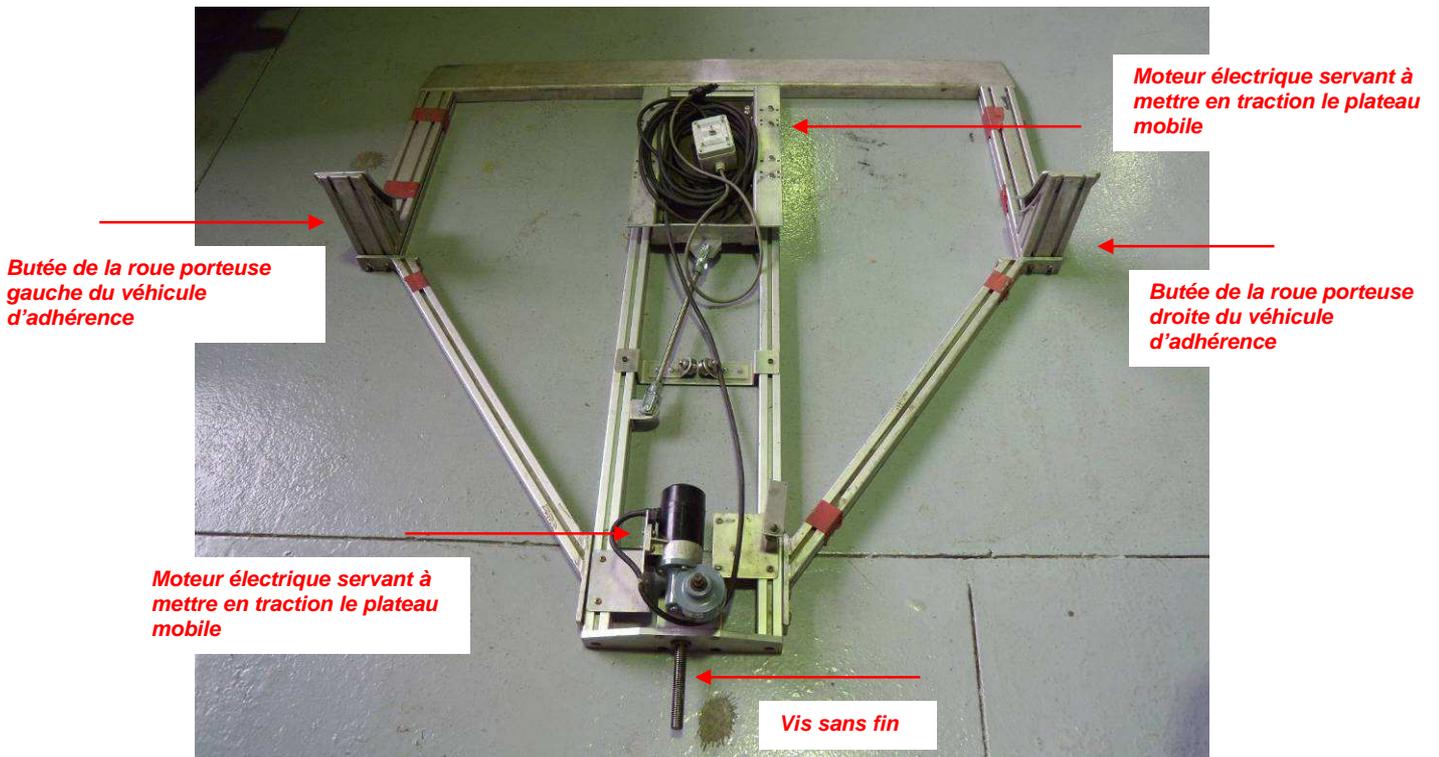


Figure 3 : Banc mécanique de traction pour le raccordement de la force horizontale (crédit STAC)

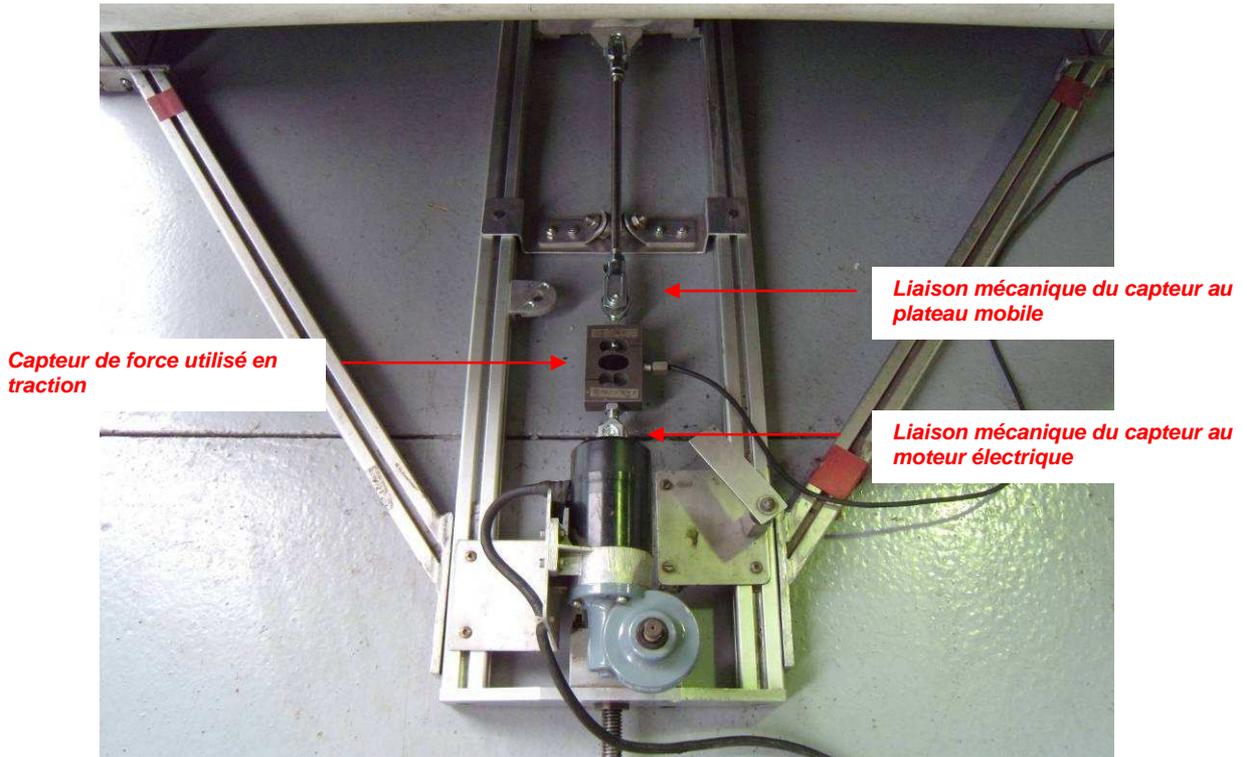


Figure 4 : Instrumentation du banc de traction

Le banc d'étalonnage mécanique est conçu de telle sorte que seule la roue de mesure est soumise à un effort de traction grâce à un plateau mobile motorisé :

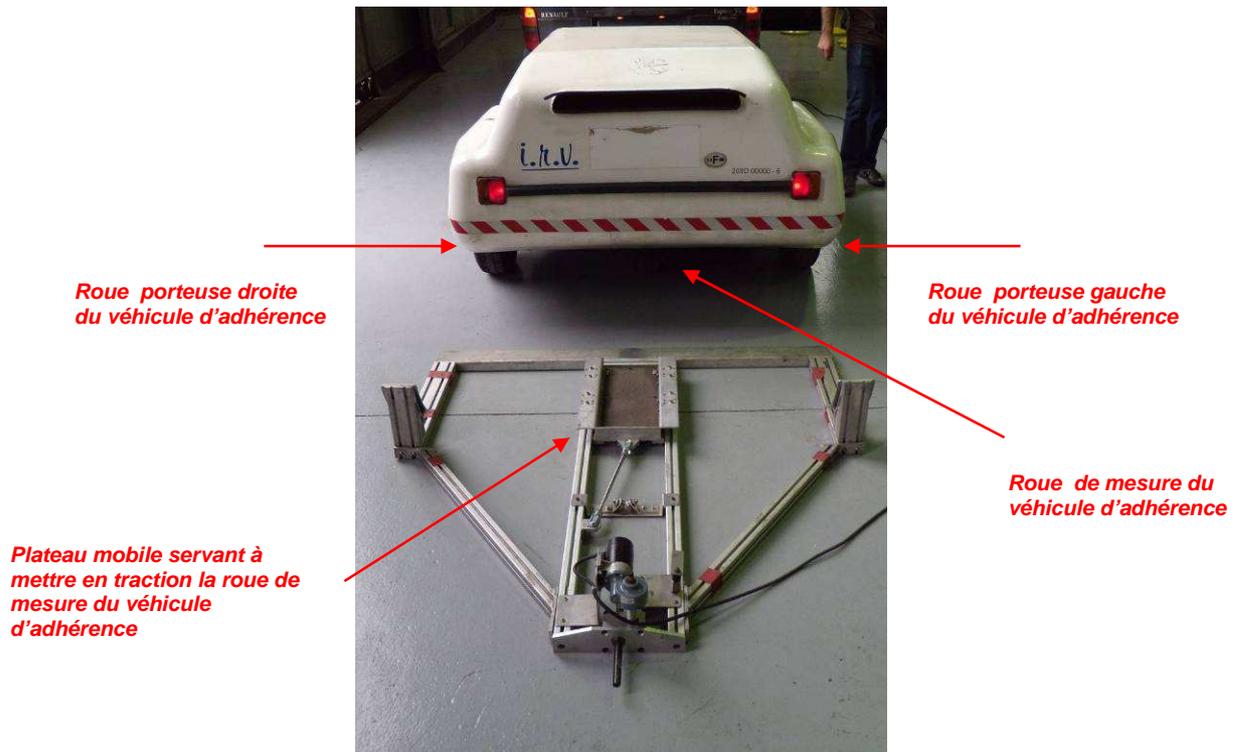


Figure 5 : Appareil de mesure en position face au banc d'étalonnage

La méthode consiste à effectuer une traction de la roue de mesure jusqu'à la valeur de 100 kg.

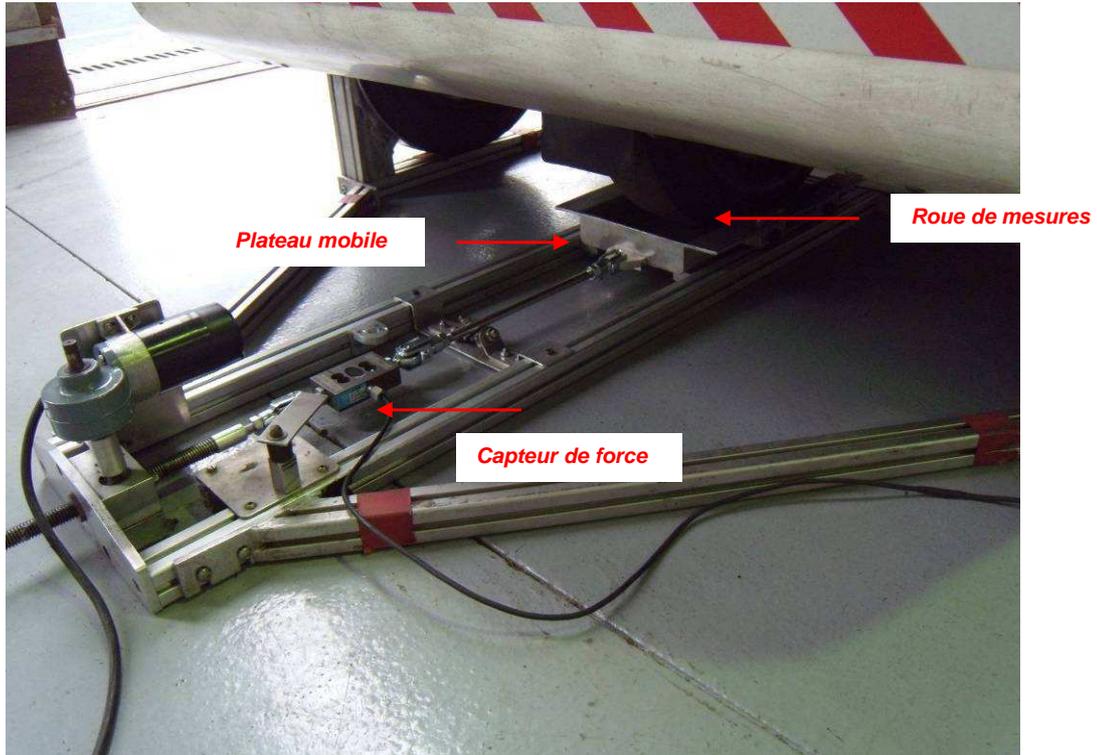


Figure 6 : Etalonnage en traction de la roue de mesure

Les chaînes de mesure des forces verticales et horizontales de l'IMAG font l'objet d'une vérification métrologique rigoureuse avant et après chaque campagne de mesure. Cette vérification consiste à apporter la preuve, par étalonnages, que les exigences spécifiées, en terme d'erreur de justesse ont été satisfaites. Dans le cadre de la gestion d'un parc d'instruments de mesure, la vérification permet de s'assurer que les écarts entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure et les valeurs des capteurs de référence sont tous inférieurs aux écarts maximaux tolérés (EMT), définies par les procédures internes du gestionnaire du parc. Ce processus est illustré par le schéma de la Figure 7.

Dans cet exemple, la vérification se traduira par une décision de conformité si toutes les erreurs de justesse sont inférieures à l'erreur de justesse maximale ( $E_{jmax}$ ). Dans le cas contraire, le résultat de la vérification se traduira par une décision d'ajustage, voire de réparation, de déclassement ou de réforme. Une trace écrite de la vérification effectuée est conservée dans le dossier individuel de l'appareil de mesure.

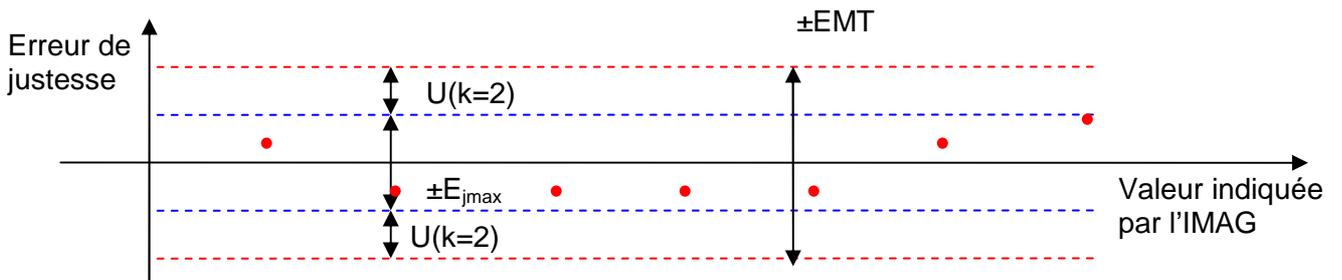


Figure 7 : Schéma représentant le processus de vérification des chaînes de mesure de l'IMAG

Trois paramètres sont importants à cette étape : l'incertitude élargie ( $U(k=2)$ ), l'erreur de justesse maximale ( $E_{jmax}$ ) et l'écart maximal toléré (EMT). L'incertitude élargie est subie. Le gestionnaire du parc d'instruments de mesure peut chercher à la réduire en investissant dans des prestations métrologiques ou des instruments plus élaborés. L'erreur de justesse maximale est définie par le gestionnaire du parc d'instruments de mesure en fonction de ses moyens et de sa politique. Il est impossible d'avoir une erreur de justesse nulle. Chercher à trop réduire l'erreur de justesse maximale risque de conduire à appliquer des corrections plus fréquentes, voire conduire à la mise à la réforme de l'équipement de mesure. L'écart maximal toléré est la somme de l'erreur de justesse maximale et de l'incertitude élargie.

L'incertitude-type associée à l'étalonnage des chaînes de mesure sera calculée de la façon suivante :

$$u(F) = \frac{EMT(F)}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

## 5.2. Incertitudes de l'étalonnage

### 5.2.1. Incertitudes de l'étalonnage des chaînes de mesure de la force verticale $F_v$

L'incertitude de l'étalonnage de la chaîne de mesure de la force verticale a été calculée en considérant les incertitudes types suivantes :

**Tableau 2 : Incertitudes types associées au raccordement de la chaîne de mesure de la force verticale  $F_v$  de l'appareil de mesure**

Terme	Signification	Détermination	Loi de probabilité	Incertitude type
$u_e$	Incertitude type de la balance étalon	Déterminée à partir des résultats de l'étalonnage externe, elle prend en compte les incertitudes associées aux conditions de chargement, à la température, à la résolution du capteur étalon.	1	$u_e$
$u_{op}$	Incertitude type associée à l'opérateur (ou reproductibilité)	Déterminée expérimentalement, en reproduisant le raccordement avec plusieurs opérateurs.	1	Ecart-type de reproductibilité
$u_{re}$	Incertitude type associée à la résolution de la balance de référence.	La résolution du capteur de référence.	Loi uniforme $1/\sqrt{3}$	Résolution/ $\sqrt{3}$
$u_r$	Incertitude type associée à la résolution de la chaîne de mesure de $F_v$	La résolution de la chaîne de mesure de l'IMAG	Loi uniforme $1/\sqrt{3}$	Résolution/ $\sqrt{3}$

L'incertitude composée ( $u$ ) et l'incertitude élargie ( $U$ ) associées à l'étalonnage interne de la chaîne de mesure de la force verticale  $F_v$  de l'appareil de mesure sont calculées à partir des équations ci-dessous :

$$u(F_v) = \sqrt{u_e^2 + u_{op}^2 + u_{re}^2 + u_r^2} \quad (3)$$

$$U(k=2)(F_v) = 2 u(F_v) \quad (4)$$

### 5.2.2. Incertitudes de l'étalonnage des chaînes de mesure de la force horizontale $F_h$

L'incertitude de l'étalonnage de la chaîne de mesure de la force horizontale a été calculée en considérant les incertitudes types suivantes :

**Tableau 3 : Incertitudes types associées au raccordement de la chaîne de mesure de la force verticale  $F_h$  de l'appareil de mesure**

Terme	Signification	Détermination	Loi de probabilité	Incrtitude type
$u_e$	Incrtitude type d'étalonnage	Déterminée à partir des résultats de l'étalonnage externe, elle prend en compte les incrtitudes associées aux conditions de chargement, à l'influence de la température, à la résolution du capteur étalon, à la dérive.	1	$u_e$
$u_{op}$	Incrtitude type associée à l'opérateur (ou reproductibilité)	Ecart type de reproductibilité lors de l'étalonnage, déterminé expérimentalement.	1	Ecart-type de reproductibilité
$u_{re}$	Incrtitude type associée à la résolution du capteur de référence	La résolution du capteur de référence.	Loi uniforme $1/\sqrt{3}$	Résolution/ $\sqrt{3}$
$u_r$	Incrtitude type associée à la résolution de la chaîne de mesure de $F_h$	La résolution de la chaîne de mesure de l'IMAG	Loi uniforme $1/\sqrt{3}$	Résolution/ $\sqrt{3}$
$u_0$	Incrtitude type due à l'erreur sur le zéro	Le STAC a défini une erreur maximale sur le zéro du capteur de référence.	Loi uniforme $1/\sqrt{3}$	Erreur/ $\sqrt{3}$

L'incertitude élargie associée à l'étalonnage interne de la chaîne de mesure de la force horizontale  $F_h$  de l'appareil de mesure est égale à deux fois la somme quadratique des incertitudes types listées ci-dessus :

$$u(F_h) = \sqrt{u_e^2 + u_{op}^2 + u_{re}^2 + u_r^2 + u_0^2} \quad (5)$$

$$U(k=2)(F_h) = 2 u(F_h) \quad (6)$$

### 5.2.3. Calcul de l'incertitude d'étalonnage sur le coefficient de frottement

Le modèle retenu dans la partie 4.4 pour décrire le système de mesure est la somme de la valeur mesurée et d'une série de termes correctifs, dont  $C_j$ , le terme correctif dû à l'étalonnage de la chaîne de mesure du CFL.

$$CFL = CFL_m + C_j + \sum_{i=1}^n C_i \quad (7)$$

L'IMAG étant constitué de deux chaînes de mesure indépendantes, la chaîne de mesure de la force horizontale et la chaîne de mesure de la force verticale, le modèle associé au terme  $C_j$  est le suivant :

$$C_j = \frac{F_h}{F_v} \quad (8)$$

La loi de propagation des incertitudes s'exprime de la manière suivante :

$$u(C_j) = \sqrt{\left(\frac{\partial C_j}{\partial F_h}\right)^2 u^2(F_h) + \left(\frac{\partial C_j}{\partial F_v}\right)^2 u^2(F_v)} \quad (9)$$

Avec :

- $u(C_j)$  : incertitude d'étalonnage
- $(\partial C_j / \partial F_h)$  : coefficient de sensibilité associé à la force  $F_h$
- $(\partial C_j / \partial F_v)$  : coefficient de sensibilité associé à la force  $F_v$
- $u(F_h)$  : contribution des différentes sources d'incertitudes associées à la mesure de la force horizontale  $F_h$
- $u(F_v)$  : contribution des différentes sources d'incertitude associée à la mesure de la force verticale  $F_v$ .

Compte tenu des équations 3 et 4, l'incertitude type associée à l'étalonnage s'écrit également :

$$u(C_j) = \sqrt{\frac{u^2(F_h)}{F_v^2} + \left(\frac{F_h}{F_v}\right)^2 u^2(F_v)} \quad (10)$$

L'étalonnage des chaînes de mesure des forces verticales et horizontales est réalisé pour une plage de valeurs correspondant aux valeurs mesurées lors des essais. L'équation ci-dessus (10), avec les

résultats des parties 5.1.1 et 5.1.2, permet de calculer l'incertitude sur l'étalonnage du coefficient de frottement.

### 5.3. Analyse des facteurs influents

La Figure 8 présente, pour différents niveaux de CFL, le poids relatif des chaînes de mesure des forces horizontales et verticales dans l'incertitude totale de la mesure du CFL. Elle montre que l'incertitude sur la force horizontale est sensiblement plus influente que l'incertitude sur la force verticale pour l'étendue des coefficients de frottement mesurés.

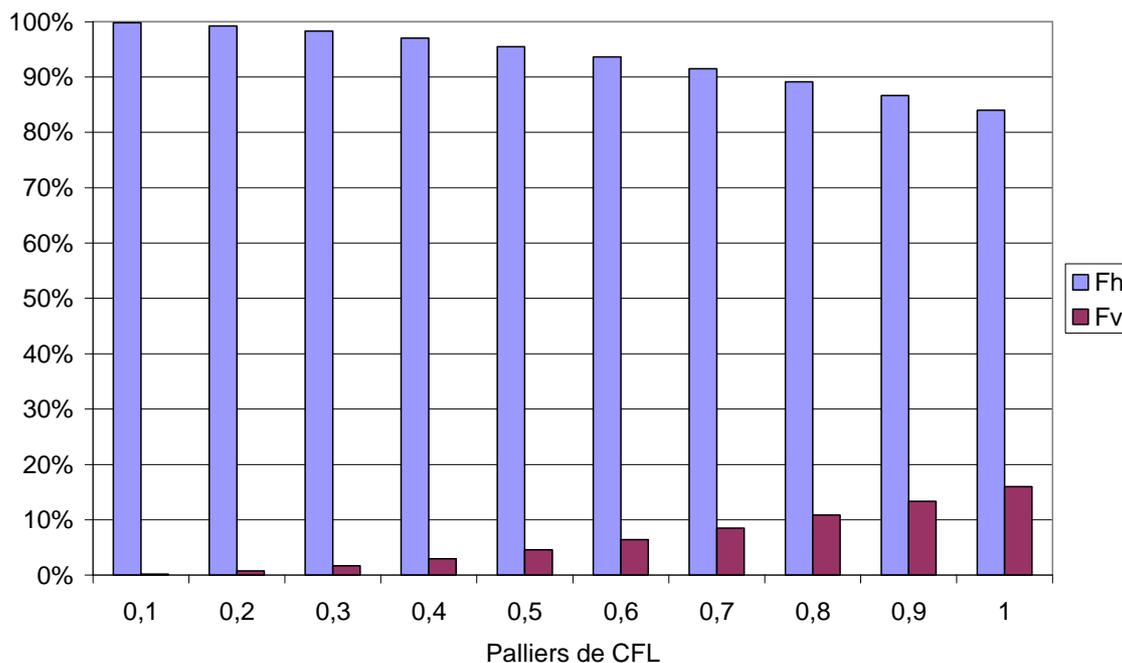


Figure 8 : Poids relatif de  $F_h$  et  $F_v$  dans l'incertitude totale de l'étalonnage et de l'utilisation de la chaîne de mesure du CFL pour différents niveaux de CFL

Ces conclusions constituent la base pour les choix et les investissements qui seront réalisés. La Figure 8 montre qu'un bénéfice significatif pourra être obtenu en travaillant spécifiquement sur la réduction des incertitudes sur  $F_h$ .

Les résultats des équations 6 et 9 peuvent être exploités de la même façon pour déterminer les paramètres ayant le plus d'influence sur l'incertitude d'étalonnage des chaînes de mesure des forces verticales et horizontales. Les résultats sont présentés Figure 9 et Figure 10.

Ces figures démontrent que la principale source d'incertitude sur l'étalonnage des chaînes de mesure du CFL provient de la reproductibilité du raccordement de la chaîne de mesure de la force horizontale au capteur de référence.

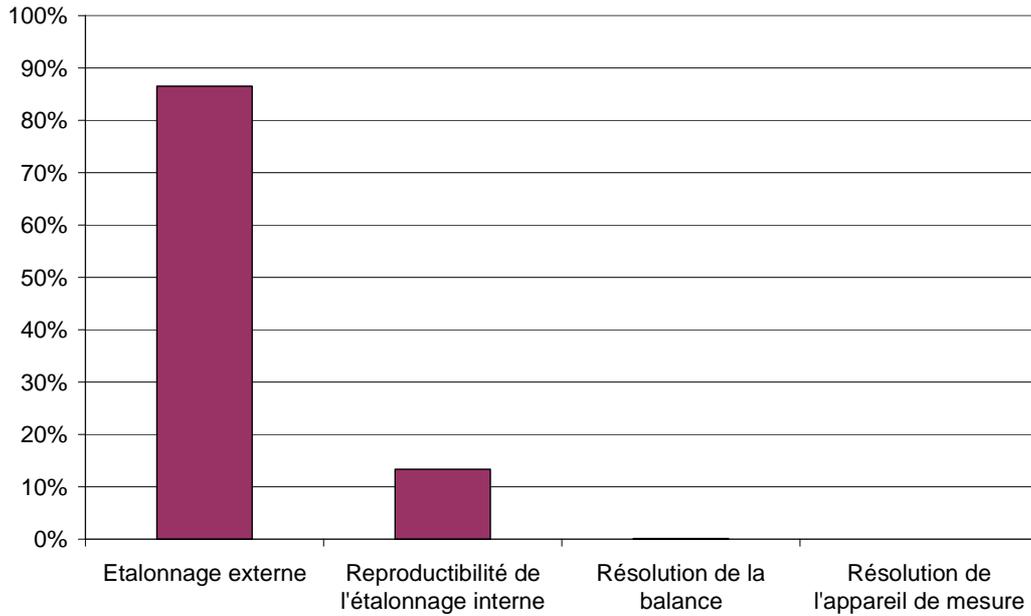


Figure 9 : Poids des différentes sources d'incertitudes dans l'incertitude totale liée à l'étalonnage et à l'utilisation de la chaîne de force verticale  $F_v$

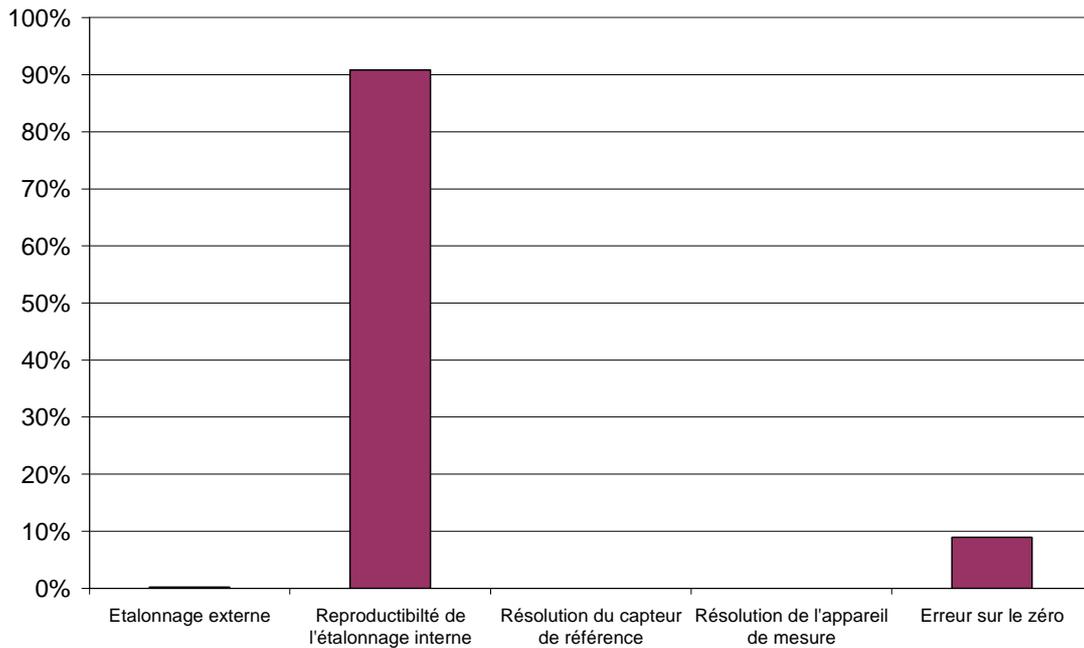


Figure 10 : Poids des différentes sources d'incertitudes dans l'incertitude totale liée à l'étalonnage de la chaîne de force horizontale  $F_h$

## 6. Incertitudes liées à l'utilisation du système de mesure

Le modèle retenu partie 4.4 pour décrire le système de mesure est la somme de la valeur mesurée et d'une série de termes correctifs dus aux différents paramètres d'essai.

$$CFL = CFL_m + C_j + \sum_{i=1}^n C_i \quad (11)$$

Cette partie s'attache à déterminer les termes correctifs  $C_i$ . Ne disposant pas de modélisation physique du phénomène, la méthodologie retenue s'appuie sur une évaluation expérimentale des incertitudes de mesure. Des campagnes expérimentales ont été réalisées sur la piste d'essai du site de l'IFSTTAR à Nantes.

## **6.1. Présentation des campagnes expérimentales**

### **6.1.1. Paramètres étudiés**

Une première étude de répétabilité et de reproductibilité a été réalisée en mars 2008. Ensuite, trois plans d'expérience ont été réalisés, le premier en avril 2010 et les deux suivants en septembre 2011.

Ces essais ont permis de déterminer la répétabilité et la reproductibilité de la méthode de mesure dans un premier temps, puis d'étudier l'influence des paramètres d'essai identifiés dans la partie 4. Ces paramètres ont varié autour de leur valeur nominale d'utilisation dans des proportions correspondant à des variations possibles :

- Etat d'usure du pneumatique de la roue de mesure
  - pneumatique neuf : après 10 km de rodage (conformément aux recommandations de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route)
  - pneumatique usé : proche de la limite acceptable d'utilisation (profondeur du témoin d'usure de 4 mm, selon les critères du STAC)
- Pression de gonflage du pneumatique de la roue de mesure : pneumatique gonflé à la valeur nominale de 1,5 bar ainsi qu'aux valeurs limites autorisées (critères internes du STAC) de 1,4 et 1,6 bar
- Hauteur du film d'eau : La hauteur du film d'eau est asservie à la vitesse d'essai afin d'obtenir des épaisseurs théoriques du film d'eau de 0,9 mm, 1 mm et 1,1 mm pour toutes les vitesses d'essai
- Hauteur de la goulotte délivrant le jet d'eau : hauteur nominale de 75 mm ainsi qu'aux valeurs de 65 et 85 mm par rapport au sol
- Vitesse d'essai : 5 km/h au dessous ou au dessus de la vitesse d'essai nominale
- Taux de glissement : taux de glissement à la valeur nominale de 15 % ainsi qu'aux valeurs de 10 et de 20 %
- Assiette du véhicule : hauteur de l'attelage réglée à 28 cm et 32 cm du sol

Chaque campagne d'essai a été réalisée sans changer les équipes conducteur/opérateur d'essai, afin de négliger l'effet opérateur dans l'analyse des résultats. Les paramètres d'essai sont récapitulés dans le Tableau 4 :

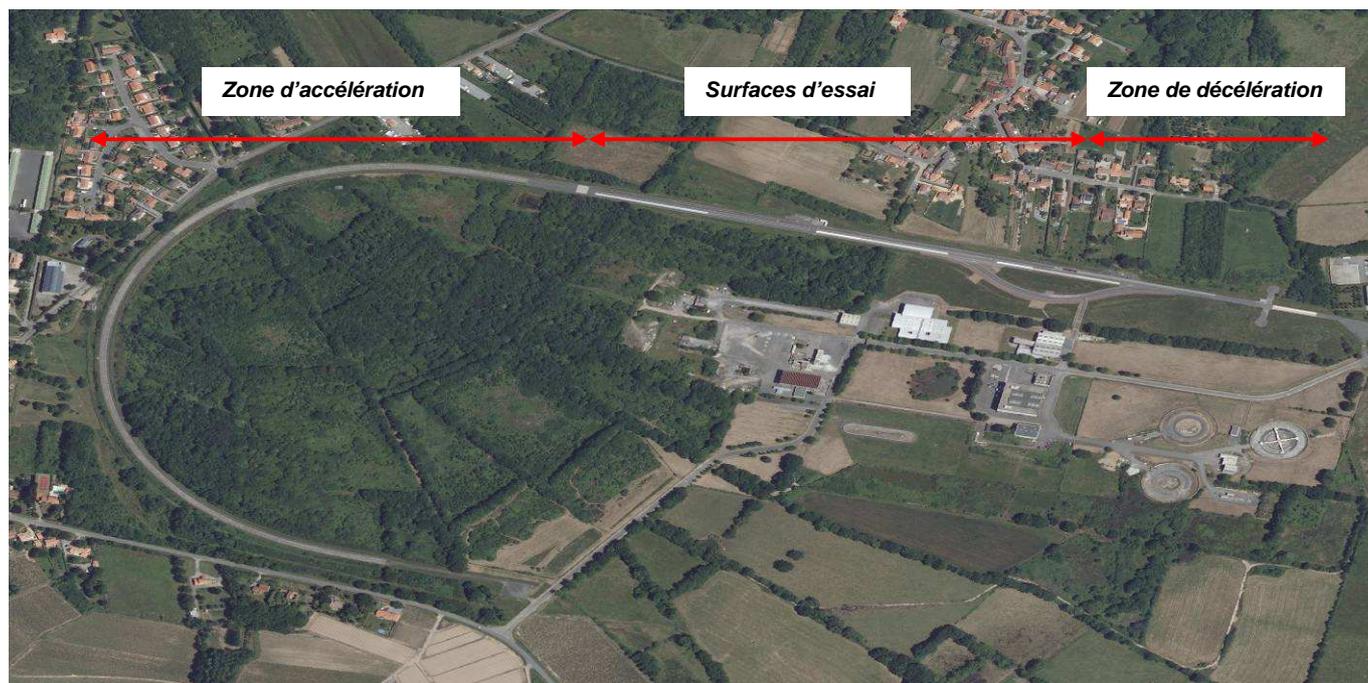
**Tableau 4 : Paramètres du plan d'expérience**

Paramètres	Valeur haute (+1)	Valeur nominale (0)	Valeur basse (-1)
Etat d'usure du pneumatique (Profondeur du témoin d'usure)	Neuf (8 mm)	-	Usé (4 mm)
Pression de gonflage	1,6 bar	1,5 bar	1,4 bar
Débit	1,1 mm	1,0 mm	0,9 mm
Hauteur de la goulotte	85 mm	75 mm	65 mm
Vitesse d'essai	+ 5 km/h	40, 65 ou 95 km/h	- 5 km/h
Taux de glissement	20 %	15 %	10 %
Assiette du véhicule	32 cm	30 cm	28 cm

Pour chaque combinaison, trois répétitions ont été réalisées, afin de pouvoir juger de la répétabilité de la mesure.

#### 6.1.2. Présentation du site d'essai

Les campagnes expérimentales ont été réalisées sur la piste d'essai du site de l'IFSTTAR à Nantes (Figure 11).



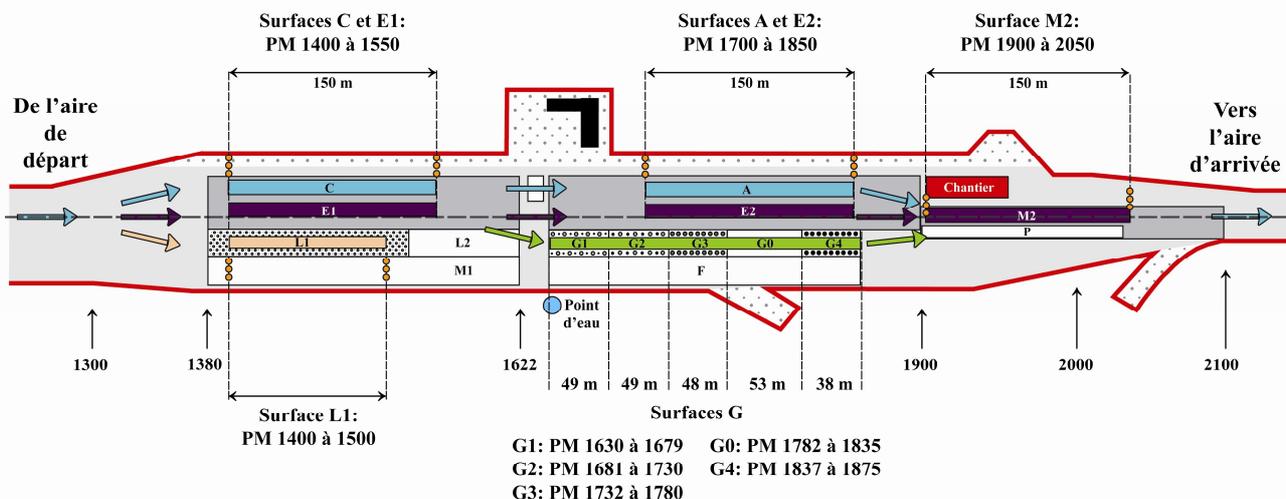
**Figure 11 : Photographie aérienne de la piste d'essai de l'IFSTTAR**

#### 6.1.3. Description de la piste d'essai

Le site d'essai a été spécialement conçu pour la calibration, l'homologation et la certification des appareils de mesure des caractéristiques de surface (adhérence, texture, uni, bruit...). Il se décompose en trois parties :

- Un demi-cercle de 1400 m de long utilisé pour l'accélération du véhicule,
- Une zone de 500 m de long (Figure 12) composée de 11 surfaces d'essai couvrant un large domaine de valeurs de frottement,

- Une zone de 400 m pour permettre la décélération du véhicule.



**Figure 12 : Disposition des surfaces d'essai**

Les surfaces A, E1, E2 et M2 font 150 m de long et 2 m de large. Elles présentent des niveaux de frottement allant de moyen à élevé. Les surfaces G0 à G4 font 50 m de long et 2 m de large. Les surfaces G1 à G4 ont été peintes afin de présenter de manière artificielle des niveaux de frottement bas. La surface L1 fait 100 m de long et 2 m de large et est recouverte d'époxy afin de présenter des niveaux très bas de frottement. Les matériaux de surface sont présentés dans le Tableau 5 :

**Tableau 5 : Matériaux composant les couches de roulement des surfaces de la piste d'essai**

Surfaces	Matériaux
A	Enrobé drainant (0/6)
C	Enduit (0,8/1,5)
E1	Béton bitumineux semi-grenu (0/10)
E2	Béton bitumineux semi-grenu (0/10)
G0	Béton Bitumineux ordinaire
G1	Surface peinte
G2	Surface peinte avec ajout de micro-bille de verre
G3	Surface peinte avec ajout de micro-bille de verre et d'éclat de verre +
G4	Surface peinte avec ajout de micro-bille de verre et d'éclat de verre ++
L1	Epoxy
M2	Béton bitumineux très mince (0/6)

La Figure 13 présente des photographies de certaines surfaces de la piste d'essai.



Surface E1: Béton bitumineux semi-grenu (0/10)



Surface G4: Surface peinte +++



Surface M2: Béton bitumineux très mince (0/6)



Surface G0: Enrobé "basse adhérence"

**Figure 13 : Photographies de quatre surfaces**

## 6.2. Résultats des campagnes expérimentales

Les résultats sont présentés par vitesses d'essai et par paramètres, dans le tableau ci-dessous. Ils ont mis en évidence une sensibilité des résultats à la vitesse d'essai. Les graphiques du Tableau 6 présentent, pour une vitesse donnée et pour chaque surface d'essai, la moyenne des coefficients de frottement longitudinaux mesurés pour chaque valeur du paramètre testé. La répétabilité de l'essai est également représentée, par la barre verticale noire. Un effet sera considéré comme significatif si la différence entre les valeurs moyennes, pour chaque paramètre testé, est supérieure à deux fois l'écart type de répétabilité.

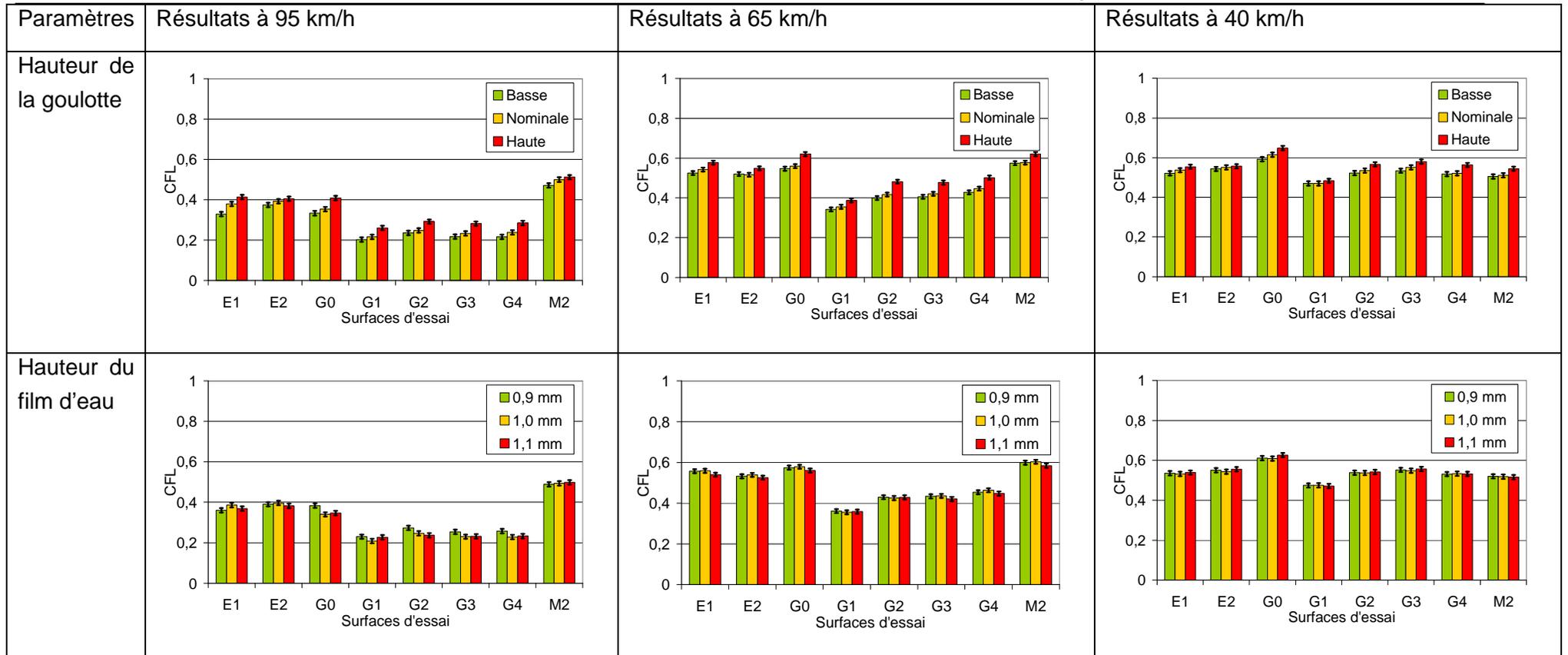
Les résultats montrent que l'usure du pneumatique, la pression de gonflage du pneumatique et la position de la goulotte ont un effet significatif sur la mesure.

La hauteur du film d'eau, la vitesse de l'essai, le taux de glissement et l'assiette du véhicule n'ont pas d'effet significatif sur le résultat de la mesure, pour l'étendue de la variation testée.

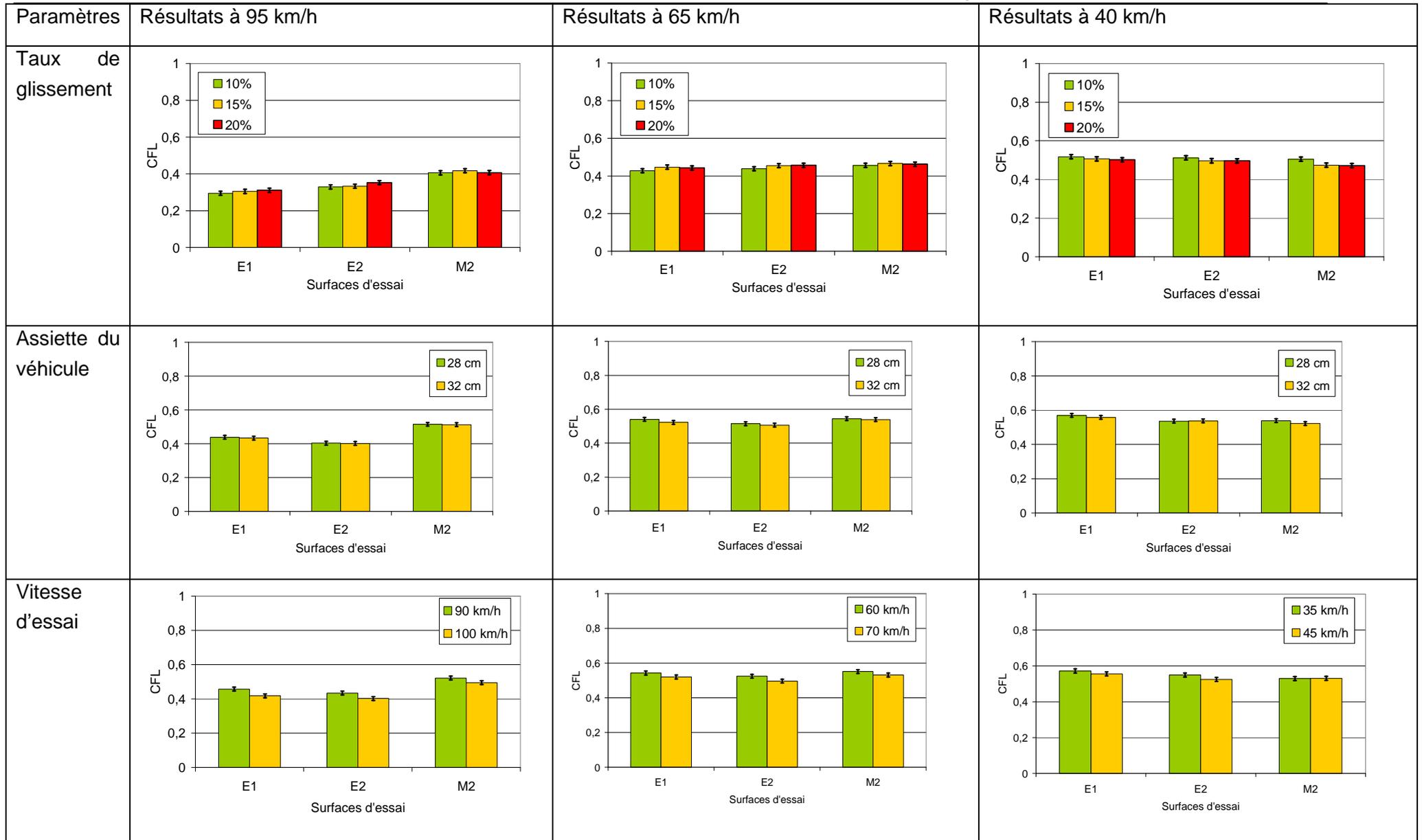
Tableau 6 : Résultats des campagnes expérimentales

Paramètres	Résultats à 95 km/h	Résultats à 65 km/h	Résultats à 40 km/h
Usure du pneumatique	<p>Bar chart showing CFL vs Surfaces d'essai at 95 km/h. The y-axis is CFL (0 to 1) and the x-axis is Surfaces d'essai (E1, E2, G0, G1, G2, G3, G4, M2). Two series are shown: Neuf (green) and Usé (orange). CFL values are generally higher for Neuf than for Usé, with a notable drop for G1 in the Usé condition.</p>	<p>Bar chart showing CFL vs Surfaces d'essai at 65 km/h. The y-axis is CFL (0 to 1) and the x-axis is Surfaces d'essai (E1, E2, G0, G1, G2, G3, G4, M2). Two series are shown: Neuf (green) and Usé (orange). CFL values are generally higher for Neuf than for Usé.</p>	<p>Bar chart showing CFL vs Surfaces d'essai at 40 km/h. The y-axis is CFL (0 to 1) and the x-axis is Surfaces d'essai (E1, E2, G0, G1, G2, G3, G4, M2). Two series are shown: Neuf (green) and Usé (orange). CFL values are generally higher for Neuf than for Usé.</p>
Pression de gonflage du pneumatique	<p>Bar chart showing CFL vs Surfaces d'essai at 95 km/h. The y-axis is CFL (0 to 1) and the x-axis is Surfaces d'essai (E1, E2, G0, G1, G2, G3, G4, M2). Three series are shown: 1,4 bar (light green), 1,5 bar (yellow), and 1,6 bar (red). CFL values are generally higher for 1,5 bar and 1,6 bar than for 1,4 bar.</p>	<p>Bar chart showing CFL vs Surfaces d'essai at 65 km/h. The y-axis is CFL (0 to 1) and the x-axis is Surfaces d'essai (E1, E2, G0, G1, G2, G3, G4, M2). Three series are shown: 1,4 bar (light green), 1,5 bar (yellow), and 1,6 bar (red). CFL values are generally higher for 1,5 bar and 1,6 bar than for 1,4 bar.</p>	<p>Bar chart showing CFL vs Surfaces d'essai at 40 km/h. The y-axis is CFL (0 to 1) and the x-axis is Surfaces d'essai (E1, E2, G0, G1, G2, G3, G4, M2). Three series are shown: 1,4 bar (light green), 1,5 bar (yellow), and 1,6 bar (red). CFL values are generally higher for 1,5 bar and 1,6 bar than for 1,4 bar.</p>

Etude des incertitudes de mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussures aéronautiques



Etude des incertitudes de mesure de l'adhérence fonctionnelle des chaussures aéronautiques



### 6.3. Les incertitudes types du système de mesure

Afin de déterminer l'incertitude type associée à chacun de ces paramètres, et en raison du manque d'information sur la loi suivie par le phénomène, la loi uniforme a été retenue. Celle-ci maximise la valeur de l'incertitude calculée.

**Tableau 7 : Calcul des incertitudes types pour les paramètres étudiés à 95 km/h**

Sources d'incertitudes (C <sub>i</sub> )	Détermination	Loi de probabilité	Incertitude type u(C <sub>i</sub> )
Répétabilité	Estimation expérimentale	1	Ecart-type de répétabilité
Etat d'usure du pneumatique	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3
Pression de gonflage du pneumatique	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3
Hauteur de la goulotte	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3
Débit	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3
Taux de glissement	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3
Assiette du véhicule	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3
Vitesse	Demi-étendue déterminée expérimentalement (partie 6.2)	Loi uniforme 1/√3	Demi-étendue/√3

### 6.4. Détermination de l'incertitude composée

L'application de la loi de propagation des incertitudes au modèle retenu dans la partie 4.4 conduit à la formule suivante de l'incertitude composée :

$$u^2(CFL) = u^2(CFL_m) + u^2(C_j) + \sum_{i=1}^n u^2(C_i) \quad (12)$$

Les termes u(C<sub>i</sub>) désignent l'incertitude liée au paramètre C<sub>i</sub>, tandis que u(CFL<sub>m</sub>) désigne la répétabilité de la mesure.

L'incertitude composée peut donc être calculée à partir des résultats du paragraphe 6.3.

### 6.5. Détermination de l'incertitude élargie

L'incertitude élargie U est la grandeur définissant un intervalle, autour du résultat de la mesure, dont on peut s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande.

L'incertitude élargie est le produit de l'incertitude composée par un facteur d'élargissement k. La valeur de k=2 est généralement retenue et correspond à un niveau de confiance de 95,45 %.

$$U(CFL) = 2 \cdot u(CFL) \tag{13}$$

Ainsi, le résultat de la mesure du coefficient de frottement longitudinal du STAC est exprimé sous la forme du résultat de la mesure et de l'incertitude élargie associée à cette mesure :

$$CFL = CFL_m \pm U(CFL) \tag{14}$$

### 6.6. Analyse de l'influence des paramètres d'essai

A ce stade de l'étude, il est possible de quantifier l'importance relative des paramètres étudiés sur la mesure du CFL. La Figure 14 présente ces résultats pour chacune des vitesses d'essai. Elle montre que le système est particulièrement sensible au processus d'étalonnage. L'effet « état d'usure du pneumatique » d'essai est le paramètre expérimental le plus significatif, pour toutes les vitesses d'essai.

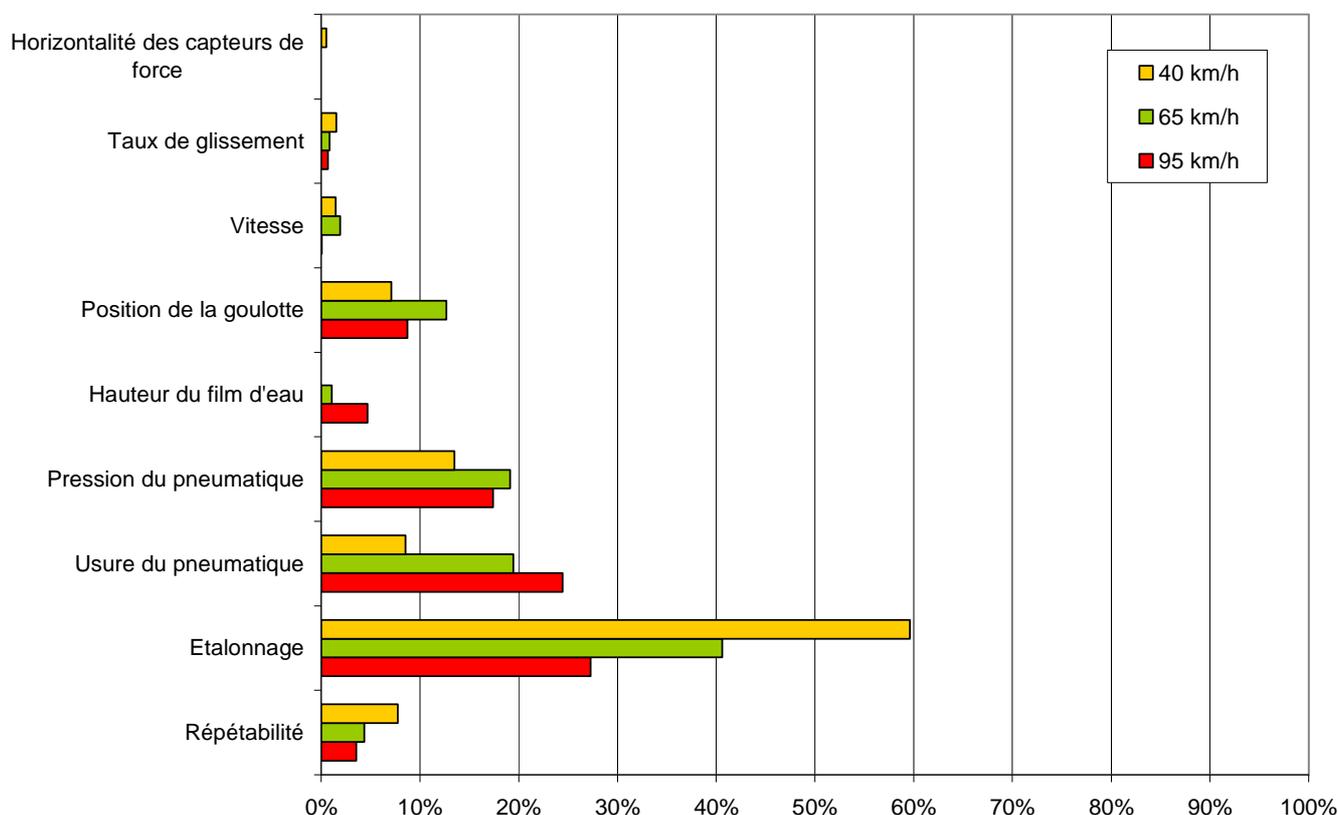


Figure 14 : Poids relatif de différentes sources d'incertitudes dans l'incertitude totale

## 7. Synthèse des résultats de l'étude

Cette étude a permis de mettre en évidence les facteurs sensibles pour assurer la qualité des mesures d'adhérence fonctionnelle pour les appareils détenus par le STAC : l'étalonnage de la chaîne de mesure de la force horizontale, le pneumatique (usure et pression) et le système de mouillage sont ressortis comme les paramètres les plus importants.

En extrapolant les conclusions de cette étude à tous types d'appareils, il est donc recommandé de contrôler les points suivants pour garantir la qualité du résultat de la mesure :

- L'étalonnage : la machine doit être étalonnée, selon les recommandations du constructeur, au minimum tous les deux ans,
- L'état du pneumatique : son âge (date de fabrication), son aspect visuel (pas de défaut visible, pas de tâche, pas de déformation...), le rodage, la profondeur du témoin d'usure, la pression de gonflage, la dureté Shore A...
- Le réglage de la goulotte délivrant le jet d'eau (hauteur par rapport au sol, distance par rapport à la roue de mesure, centrage par rapport à la roue de mesure, angle par rapport au sol).

Les pneumatiques d'essai étant normalisés, il convient au minimum de respecter les valeurs recommandées dans ces normes :

**Tableau 8 : Synthèse des recommandations normatives pour les différents types de pneumatiques d'essai**

Référence	ASTM 670 (ref. 7)	ASTM 1551 (ref. 8)	AIPCR (ref. 6)
Durée de vie	1 an	1 an	18 mois
Rodage	Disparition du film de gomme brillant		10 km en essai ou 320 km en roue libre
Témoin d'usure	Néant	4 témoins d'usure : Neuf = 4,1 mm Usé = plus de témoin visible	2 témoins d'usure : Neuf = 8 mm Usé = plus de témoin visible
Dureté (Shore A)	65	58	53
Pression de gonflage (kPa)	210	210	150

Le STAC se montre plus précis sur certains de ces paramètres. Le respect des valeurs précisées dans le tableau ci-dessous conduit à des incertitudes acceptables au regard des exigences du STAC :

**Tableau 9 : Tolérances acceptables au regard des exigences du STAC sur les paramètres d'essai pour la réalisation des essais d'adhérence fonctionnelle**

Paramètre	Valeur haute	Valeur cible	Valeur basse
Profondeur du témoin d'usure	Neuf et rodé (8 mm)	-	Usé (4 mm)
Pression de gonflage du pneumatique d'essai	1,6 bar (soit 160 kPa)	1,5 bar (soit 150 kPa)	1,4 bar (soit 140 kPa)
Hauteur d'eau	1,1 mm	1,0 mm	0,9 mm
Vitesse d'essai	+ 5 km/h	-	- 5 km/h
Taux de glissement	20 %	15 %	10 %
Hauteur de la goulotte	85 mm	75 mm	65 mm
Assiette du véhicule	32 cm	30 cm	28 cm

## Terminologie et acronymes

### Acronymes

GUM : Guide pour l'expression des incertitudes de mesures

IMAG : Instrument de Mesure Automatique de Glissance

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

STAC : Service Technique de l'Aviation Civile

### Termes techniques

CFL : Coefficient de frottement Longitudinal

C<sub>j</sub> : Terme correctif associé au paramètre j

E<sub>jmax</sub> : Erreur de justesse maximale tolérée

EMT : Ecart maximal toléré

F<sub>h</sub> : Force horizontale

F<sub>v</sub> : Force verticale

u : incertitude type

U : incertitude élargie (pour k=2)



service technique de l'Aviation civile  
CS 30012  
31, avenue du Maréchal Leclerc  
94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX  
Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00  
Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

Site de Toulouse  
9, avenue du Docteur Maurice Grynfolgel - BP 53735  
31037 TOULOUSE CEDEX  
Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00  
Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

Centre de test de détection d'explosifs  
Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38  
40602 BISCARROSSE CEDEX  
Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73  
Fax 33 (0) 5 58 78 02 02