

Estimation des incertitudes

1 LA MAITRISE DES INCERTITUDES

Tout résultat d'un mesurage est affecté d'une incertitude de mesure. Par opposition à l'erreur de mesure qui est connue, l'incertitude de mesure révèle que tout résultat est affecté d'une quantité de paramètres qui ne peuvent être déterminés de manière exacte, Cela se traduit par l'impossibilité de déterminer une valeur vraie pour chaque mesurage et par la mise en évidence d'un ensemble de mesures affectées d'une certaine dispersion. La connaissance et la maîtrise de cette dispersion permettent de déterminer la confiance qui peut être accordée à chaque résultat de mesurage.

Afin de déterminer l'incertitude associée à chaque type de mesurage, une méthode doit être appliquée. Celle-ci doit tenir compte des moyens et des méthodes mises en œuvre, du milieu, dans lequel sont faites les mesures, de la matière et de la main d'œuvre (méthode dite « des 5 M »). En outre, des outils mathématiques doivent être utilisés.

L'incertitude de mesure associée à chaque résultat de mesurage doit être évaluée et prise en compte lors de la comparaison de chaque résultat aux erreurs maximales tolérées fixées par la réglementation intégrée.

Nota : les méthodes reconnues et le vocabulaire employé sont définis, en particulier, dans le Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) JCGM 2008 et dans le Guide pour l'expression des incertitudes (Évaluation des données de mesure) — GUM. Ces documents sont disponibles sur le site internet du BIPM :

- <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/vim.html>
- <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>

Dans cette partie, il sera tenu compte des caractéristiques propres à chaque moyen mis en œuvre, en termes de résolution d'affichage, d'incertitude issue d'un étalonnage ou des données techniques fournies par le fabricant.

1.1 Définitions

Mesurande (VIM)

Grandeur que l'on veut mesurer

Méthode de mesure (VIM)

Description générique de l'organisation logique des opérations mises en œuvre dans un mesurage

NOTE Les méthodes de mesure peuvent être qualifiées de diverses façons telles que :

- méthode de mesure directe (méthode du l au sol, mesure du w sur piste),
- méthode de mesure indirecte (mesure du l aux rouleaux).

Grandeur d'influence (VIM)

Grandeur qui, lors d'un mesurage direct, n'a pas d'effet sur la grandeur effectivement mesurée, mais a un effet sur la relation entre l'indication et le résultat de mesure

Incertitude de mesure (VIM)

Paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées.

Incertitude-type u

incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type

Incertitude-type composée u_c

Incertitude-type obtenue en utilisant les incertitudes-types individuelles associées aux grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure.

Incertitude élargie $U = k u_c$

Produit d'une incertitude-type composée et d'un facteur supérieur au nombre un

NOTE 1 Le facteur dépend du type de la loi de probabilité de la grandeur de sortie dans un modèle de mesure et de la probabilité de couverture choisie.

NOTE 2 Le facteur qui intervient dans la définition est un facteur d'élargissement.

NOTE 3 L'incertitude élargie est appelée «incertitude globale» au paragraphe 5 de la Recommandation INC-1 (1980) (voir le GUM) et simplement «incertitude» dans les documents de la CEI.

NOTE 4 S'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande.

Facteur d'élargissement k (VIM)

Nombre supérieur à un, par lequel on multiplie une incertitude-type composée pour obtenir une incertitude élargie.

NOTE Dans le présent guide, ce facteur est appelé k et est pris égal à 2.

Résolution

Plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante.

Résolution d'un dispositif afficheur

Plus petite différence entre indications affichées qui peut être perçue de manière significative.

Erreur maximale tolérée : EMT

Tolérance fixée par la réglementation.

1.2 Méthodes d'évaluation des incertitudes

Selon le GUM, le résultat de mesure n'est pas une valeur unique, mais une distribution de valeurs. L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écarts-types expérimentaux (**méthode de type A**).

Exemple : réalisation de plusieurs mesures de l et de w successives

Les autres composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écarts-types, sont évaluées en admettant des lois de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations (**méthode de type B**).

Exemples : incertitude figurant dans le certificat d'étalonnage, résolution de l'afficheur

1.2.1 Évaluation de l'incertitude par la méthode de type A :

Lorsqu'on dispose d'une série de mesures (dans le cas présent, on pourra se limiter à une série de 5 mesures au minimum), on peut calculer l'incertitude à partir de l'écart-type :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{dont la moyenne est} \quad \bar{x} = \frac{\sum_i x_i}{n}$$

où

x_i : résultat de chaque mesure

\bar{x} : valeur moyenne des résultats de mesure

n : nombre de mesures

1.2.2 Évaluation de l'incertitude par la méthode de type B :

Cette évaluation est intimement liée à la maîtrise du processus de mesure et à l'expérience de l'opérateur. Les origines sont soit :

- objectives : certificat d'étalonnage, constat de vérification, notice... ;
- subjectives : expérience et savoir faire de l'opérateur.

Pour évaluer une incertitude-type avec une méthode de type B, il faut déterminer :

- Entre quelles limites varie la grandeur ;
- Quelle est la loi de probabilité présumée.

1.2.3 Incertitude composée u_c :

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + \sum_n u_n^2$$

Il s'agit de la somme quadratique des incertitudes-types identifiées pour le paramètre considéré.

1.2.4 Incertitude élargie U :

L'incertitude élargie est calculée à partir de l'incertitude composée u_c en lui appliquant un coefficient d'élargissement k , dont la valeur est fixée à 2 en métrologie légale :

$$U = k * u_c \quad \text{avec} \quad k = 2 \text{ pour une confiance d'environ } 95 \%$$

1.3 Présentation des résultats

On écrit dans tous les cas :

- Intervalle de confiance: $y = (\dots)$ unité
- Facteur d'élargissement : $k = 2$
- Incertitude élargie : $U(y) = \dots$ unité
- Incertitude relative : $\frac{U(y)}{y} = \dots\%$

$U(y)$ doit comporter 2 chiffres significatifs.

Le résultat de mesure est constitué d'une valeur numérique, de l'incertitude associée et du facteur d'élargissement correspondant et de l'unité.

2 COMPOSANTES D'INCERTITUDE LORS D'UNE INTERVENTION

Objectif : Démontrer que l'incertitude globale est suffisamment faible vis-à-vis des EMT.

L'estimation de l'incertitude doit prendre en compte tous les facteurs qui ont une influence significative sur le résultat.

2.1 Mesure de la circonférence du pneu - Méthode « au sol » avec le réglet

2.1.1 Description de la méthode

Le principe consiste à tracer une « bande » au pochoir, au moyen d'encre, sur les pneus moteurs de chaque côté du véhicule, puis à faire rouler le véhicule de telle sorte que les roues fassent au moins un tour. On mesure ensuite la distance entre les traces laissées au sol par les traces d'encre successives, la mesure étant effectuée entre les bords des deux traces. Soient l_1 le résultat de la mesure sur le premier côté et l_2 le résultat sur le second, la longueur moyenne est donnée par la relation :

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2}$$

2.1.2 Recherche des causes d'incertitudes

Il est fait application de la méthode des 5M.

La décomposition des facteurs d'influence intervenant sur la détermination de la valeur de l retenue est la suivante :

- moyen : réglet de mesure au sol (classe II, résolution 1 mm) ;
- méthode : qualité du marquage (traces au sol, fluidité de l'encre, etc.), lecture du réglet, glissement du véhicule sur la piste (accélération) ;
- matière : pression des pneumatiques du véhicule, défauts affectant la chaîne cinématique ;
- milieu : humidité et température ;
- main d'œuvre : positionnement du réglet, trajectoire.

Composantes éliminées de façon préventives

- Incertitudes liées à l'environnement

Dans la mesure où les certificats d'approbation de moyens d'essais ne fixent pas de plage de température d'utilisation, le paramètre *température ambiante* n'est pas considéré comme nécessitant une surveillance particulière (la plage de température définie dans la notice d'utilisation du fabricant est une simple recommandation de bon fonctionnement).

Si l'égouttage du pneumatique est suffisant et si le sol est correctement adhérent pour assurer un marquage satisfaisant lors de la mesure du l au sol, ainsi que pour éviter le phénomène de glissement sur le banc, le paramètre *humidité du pneumatique* peut alors être considéré comme étant négligeable.

L'opérateur étant formé et habilité à la réalisation des inspections périodiques (IP), les paramètres *glissement* et *trajectoire du véhicule* peuvent être considérés comme négligeables.

- Incertitude liée à la pression des pneumatiques

La pression nominale de gonflage des pneus d'un véhicule est prévue par le constructeur ou par le fabricant. Cette pression est fonction du type de pneu, de la monte (roue seule ou jumelée), du type de véhicule et de sa charge.

Les éléments d'information recueillis auprès des fabricants permettent de considérer qu'un écart de gonflage de 0,5 bar peut provoquer une variation du périmètre de roue qui est inférieure à 1 % (pour un pneu dont le l nominal est de 3200 mm, l'écart serait inférieur à 32 mm).

Considérant, d'une part, que la réglementation impose à l'opérateur de vérifier et, le cas échéant, d'ajuster la pression de gonflage des pneus à la valeur requise, avant chaque intervention sur un véhicule et, d'autre part, que l'opérateur est formé et habilité, les risques d'intervenir sur des pneus sous ou sur-gonflés peuvent être considérés comme négligeables.

Il convient cependant d'examiner l'impact des écarts potentiels de gonflage liés à l'incertitude associée à la mesure de pression par le manomètre. Cette catégorie d'instrument est soumise à la réglementation. En revanche, elle n'est pas soumise à la vérification périodique et les dispositions applicables à l'équipement des organismes agréés pour l'installation et pour les contrôles des chronotachygraphes n'imposent pas le raccordement périodique de ces instruments. Le majorant du facteur incertitude associé à la mesure de la pression qui sera retenu sera la valeur de l'erreur maximale tolérée (EMT), qui est de 0,16 bar pour une pression de gonflage atteignant 10 bar (directive 86/217/CEE du 26 mai 1986). En considérant que cette cause d'incertitude suit une loi de probabilité uniforme (loi rectangulaire), nous obtenons :

$$u_{\text{manomètre}} = \frac{0,16}{\sqrt{3}} = 0,09 \text{ bar}$$

Cette valeur est faible comparée à la variation de 0,5 bar mentionnée précédemment. Il semble donc possible et raisonnable de considérer que ce facteur d'incertitude a un impact faible sur le périmètre du pneumatique, dès lors que l'opérateur respecte les exigences de gonflage des pneus. On peut alors considérer que, dans ces conditions, l'impact de l'incertitude associée à la mesure de pression sur la variation pouvant affecter le périmètre des pneus est négligeable, comparé à l'erreur maximale tolérée qui est de 2 % sur la mesure de distance.

Des essais seront menés par l'organisme pour confirmer que l'influence de la pression de gonflage des pneumatiques est effectivement négligeable, dès lors que l'opérateur respecte les dispositions de gonflage au moyen d'un manomètre conforme aux exigences.

2.1.3 Modélisation du processus de mesure

Pour une mesure l_i , le processus de mesure peut être décrit par la relation $l_i = l_{mi} + C_j + C_q + C_{op}$ où :

- l_{mi} est la valeur moyenne issue de la lecture sur le réglet par l'opérateur ;
- C_j est la correction d'erreur de justesse du réglet ;
- C_q est la correction sur l'erreur de résolution du réglet ;
- C_{op} est la correction due à l'effet opérateur.

Nous obtenons ainsi pour la mesure de la longueur :

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{l_{m1} + l_{m2}}{2} + C_j + C_q + C_{op} = l_m + C_j + C_q + C_{op}$$

où l_m est la circonférence moyenne des 2 roues.

2.1.4 Évaluation de l'incertitude

2.1.4.1 Répétabilité du processus de mesure

La répétabilité englobe la qualité du marquage sur les pneus (qualité du dispositif de marquage, fluidité de l'encre, écoulement sur le pneu puis au sol), une partie du défaut de la chaîne cinématique, en partie également l'accélération du véhicule, son glissement et sa trajectoire, enfin en partie le défaut de positionnement du réglet et sa lecture par un opérateur.

Pour déterminer cette cause d'incertitude, un plan d'expérience doit être mis en œuvre. Il doit tenir compte des caractéristiques de l'organisme en matière d'équipement, d'organisation, de méthodologie et de personnel.

Un opérateur doit répéter les mesures sur différents véhicules (dotés de différentes tailles représentatives de pneumatiques), au moins 5 fois pour chacun, de manière à prendre en compte

l'ensemble des causes de variabilité indiquées ci-dessus. Pour cela, le processus dans son ensemble sera répété, depuis la pose du marquage sur les pneus (pochoir ou autre dispositif) jusqu'au calcul de la circonférence moyenne qui est introduite dans le chronotachygraphe et qui est également utilisée par le banc dans la suite du processus.

Le tableau de relevé de mesures qui pourra résulter de ce plan d'expérience pourra se présenter comme suit :

Véhicule	A	B	C	D	E
Mesure du l (mm) : moyenne des valeurs gauche et droite					
Ecart-type s_{ri} (mm)					

Pour chaque série de mesure, on calculera l'écart-type s_{ri} .

$$s_{ri} = \sqrt{\frac{\sum_i (l_i - \bar{l})^2}{n - 1}}$$

où :

- l_i : valeur moyenne de chaque mesure de l sur un véhicule par un opérateur
- \bar{l} : valeur moyenne de toutes les mesures de l sur un véhicule par un opérateur
- n : nombre de mesures de l sur un véhicule par un opérateur

On retiendra alors le plus grand écart-type s_{ri} issu des essais, pour déterminer l'incertitude-type $u_{répétabilité}$:

$$u_1 = u_{répétabilité} = MAX (s_{ri})$$

Dans l'immédiat, la campagne de mesures requise n'est pas encore réalisée pour estimer ce facteur d'influence.

Une estimation de la dispersion de ce paramètre, basée sur la connaissance et l'expérience pratique de l'organisme, permet de retenir une valeur majorante de $u_{répétabilité}$ **égale à 7 mm.**

Dans les calculs suivants, nous prendrons une valeur basée sur l'expérience de 7 mm pour $u_{répétabilité}$.

Toutefois, cette valeur étant estimée, l'organisme s'engage à réaliser une campagne d'essais destinée à l'affiner, avant la réalisation de l'audit par le COFRAC.

2.1.4.2 Incertitude due à la justesse du réglet

La longueur mesurée du périmètre des pneus est comprise entre 3 et 4 m et on utilise un réglet de classe II.

Pour ce type d'équipement, la réglementation (directive 2004/22/CE du 31 mars 2004 relative aux instruments de mesure – annexe MI-008) définit l'erreur maximale tolérée applicable aux instruments, sous la forme :

$$\text{EMT} = (0,3 \text{ mm} + 0,2 L)$$

avec $L = 4 \text{ m}$ dans notre cas, ce qui donne $\text{EMT} = 1,1 \text{ mm}$.

En faisant l'hypothèse que cette cause d'incertitude suit une loi de probabilité uniforme (loi rectangulaire), nous obtenons :

$$u_2 = \frac{1,1}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,63 \text{ mm}}$$

2.1.4.3 Incertitude due à la résolution du réglet

La résolution du réglet est $q = 1 \text{ mm}$.

La demi-étendue associée à cette cause d'incertitude est $a_3 = \frac{q}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ mm}$

En faisant l'hypothèse que cette caractéristique suit une loi de probabilité uniforme, nous obtenons :

$$u_3 = \frac{a_3}{\sqrt{3}} = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,29 \text{ mm}$$

2.1.4.4 Incertitude due à l'effet opérateur (reproductibilité)

Pour déterminer cette cause d'incertitude, il est également nécessaire de procéder à une campagne de mesure (plan d'expérience) du paramètre l en faisant intervenir tous les opérateurs de l'atelier de l'organisme. Chaque opérateur répètera au moins 5 fois les mêmes mesures, sur le même véhicule (dans des conditions identiques de répétabilité). Les résultats des mesures seront reportés dans un tableau tel que celui présenté ci-dessous (le tableau comportera autant de colonnes qu'il y a de techniciens qui interviennent dans l'atelier) :

Opérateur	A	B	C	D
l (mm) (moyenne gauche et droite)				
Ecart-type s_{ri} (mm)				

Pour chaque série de mesure, on calculera l'écart-type s_{ri} .

$$s_{ri} = \sqrt{\frac{\sum_i (l_i - \bar{l})^2}{n-1}}$$

où :

l_i : valeur moyenne de chaque mesure de l sur le véhicule par un opérateur

\bar{l} : valeur moyenne de toutes les mesures de l sur le véhicule par un opérateur

n : nombre de mesures de l (nombre de valeurs moyennes) sur le véhicule par un opérateur

On retiendra alors le plus grand écart-type s_{ri} issu des essais, pour déterminer l'incertitude-type $u_{reproductibilité}$:

$$u_4 = u_{reproductibilité} = \text{MAX} (s_{ri})$$

Dans un premier temps, avant que la campagne de mesure mentionnée ci-dessus ne soit réalisée, une valeur majorante de la valeur moyenne des mesures successives de l est retenue, elle est basée sur l'expérience de l'organisme et sur ses observations :

$$u_4 = 3 \text{ mm}$$

2.1.4.5 Calcul de l'incertitude élargie sur le résultat de mesure :

L'incertitude type composée est obtenue par la relation :

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$$

Application numérique :

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{7^2 + 0,63^2 + 0,29^2 + 3^2} = 7,65 \text{ mm}$$

Nous pouvons ensuite en déduire l'incertitude élargie à 2 écarts-type, arrondie par excès :

$$U = 2 \times u_c = 16 \text{ mm}$$

L'erreur maximale tolérée (EMT) applicable sur la mesure de distance est de 2 %. L'exigence réglementaire pour le moyen d'essai a été fixée à 1/3 de cette EMT, L'incertitude estimée sur la mesure du paramètre l est correcte pour mesurer des pneumatiques d'un périmètre d'au moins 2400 mm.

2.2 Estimation de l'incertitude liée au facteur w

2.2.1 Description de la méthode

La détermination du coefficient caractéristique w du véhicule peut être fait sur banc ou sur une piste de longueur définie.

Chaque opérateur répète 10 fois les mesures sur un même véhicule.

La méthode consiste à compter les impulsions délivrées par le capteur du véhicule, lorsque les roues de celui-ci sont entraînées sur la distance requise.

2.2.1.1 Détermination sur banc à rouleaux

L'opérateur équipe les flancs des roues motrices du véhicule d'une bande réfléchissante, conformément aux prescriptions du certificat d'approbation de moyen d'essai du banc. Chaque

tour de roue est enregistré par le banc au moyen d'un capteur optique qui détecte le passage de la bande réfléchissante.

Le comptage des impulsions est réalisé à vitesse stabilisée au moyen d'un équipement branché sur le chronotachygraphe, pour un nombre de tour de roue correspondant à une distance minimale fixée par le constructeur du banc.

2.2.1.2 Détermination sur piste

L'opérateur place le véhicule à l'entrée d'une piste rectiligne plane. La longueur de cette piste est matérialisée au moyen de délimiteurs. Le comptage d'impulsions est également réalisé au moyen d'un équipement branché sur le chronotachygraphe.

Pour les mesures sur piste, il est souhaitable que l'opérateur effectue chaque fois l'ensemble du processus, y compris la mise en place des dispositifs matérialisant les bornes de cette piste (barrières, etc.).

Pour chaque détermination, l'opérateur positionne le véhicule, puis engage son déplacement sur le banc ou sur la piste et relève 3 valeurs successives w_1 , w_2 et w_3 . Il calcule ensuite la moyenne de ces trois valeurs, w_m

$$w_m = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}$$

2.2.2 Recherche des causes d'incertitudes

Il est fait application de la méthode des 5M.

La décomposition des facteurs d'influence intervenant sur la détermination de la valeur de l retenue est la suivante :

- moyen : banc à rouleau ou piste étalonnée avec un décimètre pour mesure au sol (classe II, résolution 1 mm) ;
- méthode : qualité du marquage sur les pneus (bandes collées), matérialisation de la longueur de piste (lecture du décimètre), glissement du véhicule sur la piste (accélération, freinage), prise en compte des points de début et de fin de comptage ;
- matière : pression des pneumatiques du véhicule, défauts affectant la chaîne cinématique ;
- milieu : humidité et température ;
- main d'œuvre : stabilité de la vitesse sur banc, vitesse et trajectoire sur piste,

Composantes éliminées de façon préventives ou négligeables

- Incertitudes liées à l'environnement

Dans la mesure où les certificats d'approbation de moyens d'essais ne fixent pas de plage de température d'utilisation, le paramètre *température ambiante* n'est pas considéré comme nécessitant une surveillance particulière (la plage de température définie dans la notice d'utilisation du fabricant est une simple recommandation de bon fonctionnement).

Si l'égouttage du pneumatique est suffisant et si le sol est correctement adhérent pour éviter le glissement au sol lors de la mesure du w sur piste, on peut alors considérer le paramètre *humidité du pneumatique* comme étant négligeable.

L'opérateur étant formé et habilité à la réalisation des inspections périodiques (IP), le paramètre *trajectoire du véhicule* peut être considéré comme négligeable, dès lors que la piste répond aux prescriptions (sensiblement horizontale et rectiligne) et que l'opérateur prend soin de veiller à éviter les à-coups, les démarrages et freinages brutaux.

Pour la mesure sur banc, si l'égouttage du pneumatique est suffisant pour éviter le phénomène de glissement sur le banc alors le paramètre *humidité* du pneumatique est considéré comme étant négligeable.

L'opérateur étant formé et habilité à la réalisation des IP, le paramètre de *glissement du véhicule* sur le banc peut être considéré comme négligeable. En outre, les éventuels écarts sont détectés et sont minimisés du fait de la réalisation de plusieurs séries de mesures.

La qualité du marquage (bande réfléchissante) apposé sur les flancs des pneus n'est pas retenue comme composante d'incertitude, considérant que ces bandes répondent au descriptif du manufacturier du banc et que la détection de passage par le banc est identique (front montant ou descendant) à chaque tour de roue.

- Composante liée à la pression des pneumatiques

L'impact de l'incertitude relative à la pression du pneu sur la valeur de sa circonférence a été jugée négligeable. Le lien entre la circonférence et le coefficient caractéristique est direct et linéaire. Une faible variation de l a un effet minime sur le coefficient caractéristique w .

Par conséquent, la pression des pneumatiques peut être considérée comme négligeable sur w , pour les mêmes raisons que pour la mesure de la circonférence des roues.

2.2.3 Modélisation du processus de mesure

Pour une mesure w_i , le processus de mesure peut être décrit par la relation

$$w_i = wmi + C_j + Cop, \text{ où :}$$

- wmi est la valeur moyenne issue des trois déterminations successives, lues sur l'indicateur ;
- C_j est la correction d'erreur de justesse du banc ou du décimètre (ce facteur intègre également la correction de résolution du banc ou du décimètre) ;
- Cop est la correction due à l'effet opérateur.

Nous obtenons ainsi pour le coefficient moyen :

$$w = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3} = \frac{w_{m1} + w_{m2} + \dots + w_{m10}}{10} + C_j + Cop = \bar{w}_m + C_j + Cop$$

\bar{w}_m est la valeur moyenne du coefficient caractéristique du véhicule.

2.2.4 Evaluation de l'incertitude

2.2.4.1 Répétabilité du processus de mesure

La répétabilité comprend la qualité du marquage, une partie du défaut de la chaîne cinématique, en partie également la stabilité de la vitesse (sur banc), l'accélération et le freinage du véhicule, (sur piste), son glissement et sa trajectoire, en partie les défauts de positionnement des indicateurs de positionnement du véhicule par rapport au marquage de la piste et sa prise en compte par un opérateur.

Pour déterminer cette cause d'incertitude, un plan d'expérience doit être mis en œuvre. Il doit tenir compte des caractéristiques de l'organisme en matière d'équipement, d'organisation, de méthodologie et de personnel.

Pour mener ce plan d'expérience, un opérateur doit répéter les mesures sur différents véhicules, au moins 5 fois pour chacun (ce qui correspond donc à 15 mesures de w), de manière à prendre en compte l'ensemble des causes de variabilité indiquées ci-dessus.

L'opérateur doit faire répéter le processus dans son ensemble : chaque cycle de 3 déterminations de w doit faire l'objet d'une opération complète (pour le banc, mise en place du véhicule sur les rouleaux et, pour la piste, pose des équipements de détection des bornes ou barrières) jusqu'au calcul du coefficient caractéristique moyen w_m .

Le tableau de relevé de mesures qui pourra résulter de ce plan d'expérience pourra se présenter comme suit :

Véhicule	A	B	C	D	E
Mesure du w (imp/km) : valeur moyenne de chaque série de 3 mesurages					
Ecart-type s_{ri} (imp/km)					

Pour chaque série de mesure de w , on calcule l'écart-type s_{ri} .

La technique la plus simple pour déterminer l'incertitude type u_1 est alors de prendre le plus grand écart-type : $u_{\text{répétabilité}} = \text{MAX} s_{ri}$ imp/km

La pratique par l'organisme des mesures du coefficient w permet, en attendant la réalisation de la campagne de mesures mentionnée ci-dessus, de prendre comme hypothèse majorante la valeur :

$$u_{\text{répétabilité}} = 20 \text{ imp/km}$$

2.2.4.2 Incertitude due à la justesse du banc (comptage des impulsions)

Le banc fait l'objet d'une vérification annuelle au cours de laquelle, en ce qui concerne le facteur w , un contrôle du comptage d'impulsions délivrées par le capteur du véhicule est effectué. A l'issue de cette vérification un certificat d'étalonnage est délivré. Ce certificat comporte une incertitude d'étalonnage C_b . Cette valeur est affectée d'un facteur d'élargissement k égal à 2. L'incertitude-type est alors :

$$u_b = \frac{C_b}{2}$$

L'expérience et la connaissance des bancs utilisés permettent de retenir que l'écart relatif sur la

détermination de w est inférieure à 2 ‰.

On prendra par ailleurs comme hypothèse, pour une valeur moyenne de w égale à 8000 imp/km :

$$u_b = 8 \text{ imp/km}$$

On retiendra ce majorant jusqu'à disposer d'un résultat issu d'un étalonnage.

On retiendra également comme majorant du ratio calculé sur u_b : 10^{-3} jusqu'à disposer d'un résultat issu d'un étalonnage.

2.2.4.3 Incertitude due à la résolution du banc

La résolution de l'indicateur du banc est de $i = 1$ imp/km.

La demi-étendue associée à cette cause d'incertitude est $a_{rb} = \frac{i}{2} = \frac{1}{2} = 0,5$ imp/km

En faisant l'hypothèse que cette caractéristique suit une loi de probabilité uniforme, nous obtenons :

$$u_{rb} = \frac{a_{rb}}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ imp/km}$$

En prenant comme hypothèse une valeur moyenne de w égale à 8000 imp/km, le ratio obtenu pour ce facteur est :

$$u_{rb} = \frac{0,29}{8000} = 0,04 \cdot 10^{-3}$$

2.2.4.4 Incertitude due à la justesse du décimètre

La longueur mesurée est de 20 m ou 200 m on utilise un ruban de classe II

Pour ce type d'équipement, la réglementation définit l'erreur maximale tolérée en service

$$\text{EMT} = (0,3 \text{ mm} + 0,2 L)$$

avec $L = 20$ m : EMT = 4,3 mm.

avec $L = 200$ m, EMT = 40,3 mm

En faisant l'hypothèse que cette cause d'incertitude suit une loi de probabilité uniforme (loi rectangulaire), nous obtenons :

sur 20 m
$$u_l = \frac{4,3}{\sqrt{3}} = 2,48 \text{ mm}$$

sur 200 m
$$u_l = \frac{40,3}{\sqrt{3}} = 26,27 \text{ mm}$$

2.2.4.5 Incertitude due à la résolution du réglet ou du décimètre

La résolution du réglet est $q = 1$ mm.

La demi-étendue associée à cette cause d'incertitude est $a_{rl} = \frac{q}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ mm}$

En faisant l'hypothèse que cette caractéristique suit une loi de probabilité uniforme, nous obtenons :

$$u_{rl} = \frac{a_{rl}}{\sqrt{3}} = \frac{q}{2\sqrt{3}} = 0,29 \text{ mm}$$

2.2.4.6 Correction de justesse lors de la mesure sur piste

w est le coefficient caractéristique sur 1 km. Il faut donc estimer l'impact de l'incertitude associée à la mesure de la distance de la piste sur la détermination du coefficient caractéristique w :

$$w = \frac{x}{d}, \text{ avec } x \text{ qui est le nombre d'impulsions comptées sur la distance d'essai } d$$

w est une fonction f des variables x et d : $w = f(x, d)$

L'incertitude-type composée u_{cw} est la racine carrée de la variance composée $u_{c(w)}$:

$$u_{cw}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u(x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial d}\right)^2 u(d)^2$$

$$u_{cw}^2 = \left(\frac{1}{d}\right)^2 u(x)^2 + \left(\frac{x}{d^2}\right)^2 u(d)^2$$

où : $u(x)^2 = u_b^2 + u_{rb}^2 = (10^{-3})^2 + (0,04 \cdot 10^{-3})^2$ soit, en arrondissant $u(x)^2 = 10^{-6}$

et $u(d)^2 = u_l^2 + u_{rl}^2 = (2,48 \cdot 10^{-3})^2 + (0,29 \cdot 10^{-3})^2$ soit en arrondissant $u(d)^2 = 6,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Application numérique : on veille à la conversion des différents facteurs dans la même unité.

Si la piste est de $d = 20 \text{ m}$ et que l'on considère un w moyen de 8000 imp/km
 $x = 160$ impulsions sur 20 m

$$u_{cw}^2 = \left(\frac{1}{20}\right)^2 (10^{-6}) + \left(\frac{160}{20^2}\right)^2 (6,23 \cdot 10^{-6}) = 9,98 \cdot 10^{-7}$$

soit, après arrondissement par excès et conversion du résultat pour le rapporter à la distance de 1 km : $u_{cw} = 1 \text{ imp/km}$,

Si la piste est de $d = 200 \text{ m}$ et que l'on considère un w moyen de 8000 imp/km
 $x = 1600$ impulsions sur 200 m.

$$u_{cw}^2 = \left(\frac{1}{200}\right)^2 (10^{-6}) + \left(\frac{1600}{200^2}\right)^2 (6,23 \cdot 10^{-6}) = 9,97 \cdot 10^{-7}$$

soit, après arrondissement par excès et conversion du résultat pour le rapporter à la distance de 1 km : $u_{cw} = 1 \text{ imp/km}$.

On note que l'impact de la distance de mesure est négligeable, s'il est réalisé dans des conditions maîtrisées (piste adaptée, décimètre approuvé, opérateur formé et habilité).

2.2.4.7 Correction de justesse lors de la mesure sur banc à rouleaux

Ce cas se distingue du précédent par l'absence des paramètres d'influence liés au recours à une piste au sol. Par contre, l'influence de la partie du banc relative au comptage d'impulsions doit toujours être pris en compte, au travers des incertitudes dues à la justesse et à la résolution du banc (voir ci-dessus).

2.2.4.8 Incertitude due à l'effet opérateur (reproductibilité)

Pour déterminer cette cause d'incertitudes, les différents opérateurs de l'atelier répètent 5 fois les mêmes mesures de w , sur le même véhicule (dans les conditions de répétabilité). Les résultats des mesures sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Opérateur	A	B	C	D
w (imp/km) (valeur moyenne de chaque série de 3 mesurages)				
Ecart-type s_{ri} (mm)				

Pour chaque série de mesure, on calculera l'écart-type s_{ri} .

$$s_{ri} = \sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n-1}}$$

où :

w_i : valeur moyenne de chaque série de 3 mesures de w sur le véhicule par un opérateur

\bar{w} : valeur moyenne de toutes les valeurs de w_i sur le véhicule par un opérateur

n : nombre de mesures de w (nombre de valeurs moyennes) sur le véhicule par un opérateur

On retiendra alors le plus grand écart-type s_{ri} issu des essais, pour déterminer l'incertitude-type $u_{reproductibilité}$:

$$u_{reproductibilité} = MAX (s_{ri})$$

Dans un premier temps, avant que la campagne de mesure mentionnée ci-dessus ne soit réalisée, une valeur majorante de la valeur moyenne des mesures successives de w_m est retenue, elle est basée sur l'expérience de l'organisme et sur ses observations :

$$u_{reproductibilité} = 10 \text{ imp/km}$$

2.2.4.9 Calcul de l'incertitude élargie sur le résultat de mesure :

L'incertitude type composée est obtenue pour la mesure sur piste, par la relation :

$$u_c = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{cw}^2 + u_{reproductibilité}^2}$$

L'incertitude type composée est obtenue pour la mesure sur banc à rouleaux, par la relation :

$$u_c = \sqrt{u_{rep}^2 + u_b^2 + u_{rb}^2 + u_{reproductibilité}^2}$$

Nous pouvons ensuite en déduire l'incertitude élargie à 2 écarts-type, arrondie par excès :

$$U = 2 \times u_c$$

Application numérique

	w sur piste de 20 m	w sur piste de 200 m	w sur banc à rouleaux
u_c (imp/km)	22,38	22,38	23,75
U (imp/km)	45	45	48

L'impact sur le w réel atteint au maximum 1 % pour un w nominal de 7200 mesuré sur piste et 0,7 % lorsqu'il est mesuré sur banc. Dès lors que la valeur nominale de w augmente, l'impact diminue.

Ces calculs devront être repris et affinés après les campagnes de mesure et chaque fois que les conditions de détermination changeront (changement de méthode de mesure, de moyens, etc.)