

**Commission économique pour l'Europe****Comité des transports intérieurs****Groupe de travail du transport des denrées périssables****Soixante-quatorzième session**

Genève, 8-12 octobre 2018

Point 6 a) de l'ordre du jour provisoire

**Propositions d'amendements à l'ATP :****Propositions en suspens****Précisions dans l'ATP au sujet du coefficient global de transmission thermique (ci-après coefficient K) de la caisse d'un engin de transport spécial, visant à remplacer la marge d'erreur de mesure par l'incertitude de mesure, et explications dans le Manuel ATP concernant les méthodes recommandées pour déterminer l'incertitude de mesure du coefficient K****Communication de la Fédération de Russie***Résumé***Résumé analytique :**

Le paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP fixe l'erreur maximale de mesure du coefficient global de transmission thermique (ci-après coefficient K) de la caisse d'un engin de transport spécial.

Aujourd'hui, de façon générale, la communauté scientifique utilise non plus l'expression « marge d'erreur », qui renvoie à l'erreur maximale de mesure de la valeur vraie d'une grandeur physique (valeur qu'on ne peut jamais déterminer avec une précision parfaite), mais plutôt le terme d'« incertitude », qui établit selon une probabilité donnée les limites de l'intervalle dans lequel doivent se trouver les valeurs de la grandeur physique mesurée.

L'emploi de l'expression « marge d'erreur » dans l'ATP remonte à une époque où les notions de marge d'erreur et d'incertitude de mesure n'étaient pas suffisamment différenciées. Il convient aujourd'hui de remplacer autant que faire se peut l'expression « marge d'erreur » par le terme « incertitude », afin que le texte de l'ATP soit pleinement conforme aux normes scientifiques actuelles.



**Mesures à prendre :** Modifier le libellé du paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 à l'ATP de manière à faire référence à l'incertitude de mesure dans la détermination du coefficient K, et non plus à l'erreur maximale de mesure. Modifier de manière analogue les modèles de procès-verbaux d'essai n<sup>os</sup> 2 A et 2 B de l'ATP.

Préciser en conséquence les observations relatives au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 dans le Manuel ATP.

**Document de référence :** GOST R 54500.3-2011/Guide ISO/CEI 98-3:2008 « Incertitude de mesure – Partie 3 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » (GUM:1995) (IDT).

## Introduction

1. À la soixante et onzième session du WP.11, les experts de la Fédération de Russie ont fait remarquer que la méthode d'essai prescrite dans l'ATP ne donnait pas d'indication concernant le calcul de l'erreur lors de la détermination du coefficient K.
2. À la soixante-douzième session du WP.11, la Fédération de Russie a soumis une proposition visant à introduire dans l'ATP et dans le Manuel ATP des dispositions relatives au type d'erreur de détermination du coefficient K et à la méthode de calcul de cette marge d'erreur, fondée sur l'utilisation d'un modèle mathématique lors des essais (voir ECE/TRANS/WP.11/2016/4).
3. Au cours de la discussion sur le document ECE/TRANS/WP.11/2016/4, à la soixante-douzième session du WP.11, l'expert de la France a fait observer qu'à l'heure actuelle, on utilisait la notion d'incertitude plutôt que celle de marge d'erreur. Compte tenu de la similarité des méthodes mathématiques utilisées pour déterminer la marge d'erreur et l'incertitude de mesure, autrement dit pour évaluer quantitativement l'imprécision de la mesure du coefficient K, la proposition de la Fédération de Russie a été adoptée.
4. En préparation de la soixante-treizième session du WP.11, les experts de la Fédération de Russie ont analysé avec attention les observations de la France au sujet du document ECE/TRANS/WP.11/2016/4, aimablement communiquées par leurs homologues français. Ils ont également examiné le Guide ISO/CEI 98-3:2008, qui a été traduit en russe et intégré au corpus réglementaire de la Fédération de Russie comme norme nationale GOST R 54500.3-2011. En résultat de ces travaux, les experts russes sont tombés d'accord avec les experts français sur la pertinence de se référer dans l'ATP à la notion d'incertitude de mesure du coefficient K, plutôt qu'à celle de marge d'erreur. La Fédération de Russie a donc élaboré des propositions de modification de l'ATP et du Manuel ATP en ce sens.
5. Le WP.11, à sa soixante-douzième session, a certes adopté la proposition de la Fédération de Russie (ECE/TRANS/WP.11/2016/4) relative à la modification du libellé des observations du Manuel ATP concernant le paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, mais cette proposition faisait référence à la méthode de calcul de l'erreur de mesure du coefficient K. Il est donc proposé au WP.11 d'adopter, à sa soixante-treizième session, un nouveau libellé de ces observations ; les modifications suggérées portent cette fois sur l'utilisation de la notion d'incertitude de mesure du coefficient K en lieu et place de la notion de marge d'erreur. Il est également proposé d'apporter les corrections correspondantes au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, ainsi qu'aux modèles de procès-verbaux d'essai n<sup>os</sup> 2 A et 2 B.
6. Par commodité, ces nouvelles modifications sont introduites dans la version actuelle de l'ATP (tel que mis à jour au 19 décembre 2016), ainsi que dans la version actuelle du Manuel ATP (consulté sur le site de la CEE le 5 juin 2017).

## Propositions

7. Modifier le paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP comme suit<sup>1</sup> :

« 2.3.2 Précision des mesures du coefficient K

Les stations d'essais devront être pourvues de l'équipement et des instruments nécessaires pour que le coefficient K soit déterminé avec une ~~erreur maximale de mesure~~ incertitude élargie de  $\pm 10\%$  quand on utilise la méthode de refroidissement intérieur et  $\pm 5\%$  quand on utilise la méthode de chauffage intérieur. L'incertitude de mesure élargie du coefficient K devra être calculée avec un niveau de confiance d'au moins 95 %. ».

<sup>1</sup> Les modifications apportées au texte figurent en caractères soulignés pour les ajouts et biffés pour les suppressions ; le formatage d'origine a été conservé dans tous les cas.

8. Dans le Manuel ATP, modifier les observations relatives au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP comme suit<sup>2</sup> :

« Observations relatives au paragraphe 2.3.2 :

1. Les exemples des erreurs incertitudes de mesure normalement prises en compte par les stations d'essais concernent la température, ~~la puissance absorbée~~ la puissance thermique (ou la puissance frigorifique) et la surface de la caisse.

~~La méthode de calcul de l'erreur appliquée habituellement peut être celle de l'erreur globale admissible  $\epsilon$  :~~

$$\epsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta T}{T_e - T_i}\right)}$$

~~ou celle de l'erreur maximale  $\epsilon_m$  :~~

$$\epsilon_m = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta W}{W} + 2 \cdot \frac{\Delta T}{T_e - T_i}$$

~~où :~~

~~$S$  est la surface moyenne de la caisse (moyenne géométrique des surfaces des parois intérieure et extérieure) ;~~

~~$W$  est la puissance thermique dissipée à l'intérieur de la caisse,~~

~~$T_e$  et  $T_i$  sont respectivement les températures extérieure et intérieure de la caisse faisant l'objet de l'essai.~~

L'incertitude de mesure élargie du coefficient  $K$ , notée  $U(K)$ , peut être obtenue à l'aide des recommandations figurant au paragraphe 6.3.3 du Guide ISO/CEI 98-3:2008. Dans ce cas :

$$U(K) = k \cdot u_c(K)$$

où :

$k$  est le facteur d'élargissement correspondant au niveau de confiance choisi (pour un niveau de confiance de 95 %, ce facteur sera par exemple égal à 2 ; pour un niveau de confiance de 99 %, il sera égal à 3.

$u_c(K)$  est l'incertitude type composée du coefficient  $K$ .

L'incertitude type composée du coefficient  $K$  est une estimation de l'écart type du coefficient  $K$  et caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées au coefficient  $K$ .

Étant donné que le coefficient  $K$  est fonction de grandeurs physiques telles que la puissance thermique (ou la puissance frigorifique) des échangeurs de chaleur, les températures extérieure et intérieure de la caisse et la superficie moyenne de la caisse, grandeurs physiques dont la mesure présente également une certaine incertitude type, l'incertitude type composée du coefficient  $K$  peut être calculée par application de la loi de propagation de l'incertitude, rappelée à l'article 5 du Guide ISO/CEI 98-3:2008, en tenant compte de la corrélation (temporelle) existant entre les températures extérieure et intérieure de la caisse, la puissance thermique (ou frigorifique) et la température intérieure de la caisse :

<sup>2</sup> Pour faciliter la lecture, les formules mathématiques ajoutées, y compris la description des variables, ne figurent pas en caractères soulignés.

$$u_c(K) = \sqrt{\frac{\left(\frac{u_c(W)}{\bar{S} \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{W} \cdot u_c(S)}{\bar{S}^2 \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \dots}{\bar{W}^2 \cdot (u_c(T_i)^2 + u_c(T_e)^2 + 2 \cdot r(T_e, T_i) \cdot u_c(T_e) \cdot u_c(T_i)) + \dots} + \frac{2 \cdot \bar{W} \cdot r(W, T_i) \cdot u_c(W) \cdot u_c(T_i)}{\bar{S}^2 \cdot (|\bar{T}_e - \bar{T}_i|^3)}$$

où :

$\bar{W}$ ,  $\bar{T}_e$ ,  $\bar{T}_i$ ,  $\bar{S}$  sont respectivement les valeurs moyennes calculées de la puissance thermique (ou frigorifique), en W ; des températures extérieure et intérieure de la caisse, en °C ; et de la surface moyenne de la caisse, en m<sup>2</sup> ;

$u_c(W)$ ,  $u_c(T_i)$ ,  $u_c(T_e)$ ,  $u_c(S)$  sont respectivement les incertitudes types composées de la puissance thermique (ou frigorifique), en W ; de la température extérieure et intérieure de la caisse, en °C ; et de la surface moyenne de la caisse, en m<sup>2</sup> ;

$r(T_e, T_i)$ ,  $r(W, T_i)$  sont respectivement les coefficients de corrélation entre la température extérieure et la température intérieure de la caisse, et entre la puissance thermique (ou frigorifique) et la température intérieure de la caisse.

Le coefficient de corrélation peut être assimilé au coefficient de corrélation linéaire (coefficient de Pearson). Il convient toutefois de tenir compte du fait que toute variation de la puissance thermique (ou frigorifique) et, surtout, de la température extérieure de la caisse entraîne une variation correspondante de la température intérieure, mais avec un certain décalage temporel (délai). Ce décalage temporel s'explique par la durée des transferts thermiques au sein du système "air intérieur de l'engin de transport-isolant thermique-milieu extérieur", et sa valeur en cas de variation de la température extérieure de la caisse peut atteindre plusieurs heures. Ce délai peut être déterminé soit graphiquement (par une analyse des courbes de variation des grandeurs), soit en retenant la valeur maximale du coefficient de corrélation linéaire avec un choix adapté de la distribution des températures intérieures.

Les incertitudes types composées de mesure de la puissance thermique (ou frigorifique) ainsi que de la température extérieure et de la température intérieure de la caisse peuvent être déterminées à l'aide des recommandations figurant aux chapitres 4 et 5 du Guide ISO/CEI 98-3:2008, en appliquant les formules suivantes :

$$u_c(W) = \sqrt{u_A(\bar{W})^2 + u_B(W)^2} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (W_k - \bar{W})^2}{n \cdot (n - 1)} + u_B(W)^2}$$

$$u_c(T_i) = \sqrt{u_A(\bar{T}_i)^2 + u_A(\bar{\bar{T}}_i)^2 + u_B(T_i)^2} = \sqrt{\max_{1 \leq k \leq n} \left( \frac{\sum_{i=1}^l (T_{i,i,k} - \bar{T}_{i,k})^2}{l \cdot (l - 1)} \right) + \dots + \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{T}_{i,k} - \bar{T}_i)^2}{n \cdot (n - 1)} + \dots + u_B(T_i)^2}$$

$$u_c(T_e) = \sqrt{u_A(\bar{T}_e)^2 + u_A(\bar{\bar{T}}_e)^2 + u_B(T_e)^2} = \sqrt{\max_{1 \leq k \leq n} \left( \frac{\sum_{j=1}^m (T_{e,j,k} - \bar{T}_{e,k})^2}{m \cdot (m - 1)} \right) + \dots + \frac{\sum_{k=1}^n (\bar{T}_{e,k} - \bar{T}_e)^2}{n \cdot (n - 1)} + \dots + u_B(T_e)^2}$$

$$u_c(S) = \sqrt{\frac{(\overline{S}_i \cdot u_c(S_e))^2 + (\overline{S}_e \cdot u_c(S_i))^2}{4 \cdot \overline{S}_e \cdot \overline{S}_i}}$$

où :

$u_A(\overline{W})$ ,  $u_A(\overline{T}_i)$ ,  $u_A(\overline{T}_e)$ ,  $u_A(\overline{T}_i)$ ,  $u_A(\overline{T}_e)$  sont les incertitudes types de mesure des valeurs moyennes, respectivement, de la puissance thermique (ou frigorifique), en W, des températures intérieure et extérieure de la caisse (dans le cadre de mesures effectuées simultanément à l'aide de 12 instruments de mesure), en K, et des températures intérieure et extérieure de la caisse (dans les limites d'états stationnaires), en K, obtenues par une évaluation de type A ;

$u_B(W)$ ,  $u_B(T_i)$ ,  $u_B(T_e)$  sont les incertitudes types de mesure, respectivement, de la puissance thermique (ou frigorifique), en W, et des températures intérieure et extérieure de la caisse, en K, obtenues par une évaluation de type B ;

$u_c(S_e)$ ,  $u_c(S_i)$  sont les incertitudes types composées de mesure de la superficie, respectivement, des surfaces intérieure et extérieure de la caisse de l'engin de transport spécial (sans tenir compte des ondulations), en m<sup>2</sup> ;

$W_k$  est la valeur de la puissance thermique (ou frigorifique) relevée lors de la k-ième mesure (en tout, on aura effectué n mesures lors de l'état stationnaire), en W ;

$T_{i,k}$ ,  $T_{e,j,k}$  sont les valeurs des températures relevées lors de la k-ième mesure, respectivement avec l'appareil i à l'intérieur de la caisse de l'engin de transport spécial (au total l instruments de même précision participent simultanément au même relevé de la température) et avec l'appareil j à l'extérieur de la caisse de l'engin (au total m instruments de même précision participent simultanément au même relevé de la température), en °C ;

$\overline{W}$ ,  $\overline{T}_i$ ,  $\overline{T}_e$  sont les valeurs moyennes calculées (pendant l'état stationnaire), respectivement, de la puissance thermique (ou frigorifique), en W, et des températures intérieure et extérieure de la caisse, en °C ;

$\overline{T}_{i,k}$ ,  $\overline{T}_{e,k}$  sont les valeurs moyennes calculées (dans les limites de la k-ième mesure), respectivement, des températures intérieure et extérieure de la caisse, en °C ;

$\overline{S}_i$ ,  $\overline{S}_e$ , sont les valeurs moyennes calculées de la superficie, respectivement, des surfaces intérieure et extérieure de la caisse de l'engin de transport spécial soumis à l'essai (sans tenir compte des ondulations), en m<sup>2</sup>.

$$\overline{W} = \frac{\sum_{k=1}^n W_k}{n}$$

$$\overline{T}_i = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^l T_{i,k}}{n \cdot l}$$

$$\overline{T}_e = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m T_{e,j,k}}{n \cdot m}$$

$$\overline{T}_{i,k} = \frac{\sum_{i=1}^l T_{i,k}}{l}$$

$$\overline{T}_{e,k} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{e,j,k}}{m}$$

Si la puissance thermique (ou frigorifique) des échangeurs de chaleur a été déterminée à partir de l'énergie électrique consommée par ces appareils, alors il faut en tenir compte dans les calculs menant à l'incertitude du résultat final.

Le chapitre 4.3 du Guide ISO/CEI 98-3:2008 porte sur l'évaluation des incertitudes types dans le cadre de l'évaluation de type B. Dans la présente observation, on propose une formule de calcul de l'incertitude type B fondée sur un intervalle connu (limites supérieure et inférieure) pour l'évaluation de la grandeur physique mesurée. Cette situation se rencontre souvent dans la pratique et renvoie à des notions telles que la classe de précision de l'appareil et sa marge d'erreur. Si l'on note 2a l'intervalle dans lequel doit se trouver la valeur physique mesurée x (ce qui correspond à la notation  $\pm a$  couramment utilisée pour la marge d'erreur d'un instrument de mesure), alors :

$$u_B(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

2. Dans des conditions normales d'essai, on peut mesurer S à moins de  $\pm 1\%$   $\bar{S}_i$  et  $\bar{S}_e$  avec une grande précision. On peut considérer que l'incertitude type composée est alors égale à  $\pm 1\%$ . Toutefois, dans certains cas, il n'est pas possible d'atteindre une telle précision.

De manière générale, on peut appliquer la méthode ci-après pour calculer les incertitudes types composées de  $S_i$  et  $S_e$ , que l'on utilise pour déterminer la surface S de transfert thermique de la caisse.

Si on considère  $\bar{S}_i$  et  $\bar{S}_e$  comme fonctions d'une série de paramètres  $\bar{p}_i$  et  $\bar{p}_e$ , mesurés de multiples fois (par exemple les longueurs, largeurs et hauteurs mesurées en différents points de la caisse de l'engin de transport spécial) :

$$S_i = f_1(p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_y}, \dots, p_{i_Y})$$

$$S_e = f_2(p_{e_1}, p_{e_2}, \dots, p_{e_z}, \dots, p_{e_Z})$$

alors on peut calculer leur incertitude type composée à l'aide des formules suivantes :

$$u_c(S_i) = \sqrt{\sum_{y=1}^Y \left( u_c(p_{i_y}) \cdot \frac{\partial f_1}{\partial p_{i_y}} \right)^2}$$

$$u_c(S_e) = \sqrt{\sum_{z=1}^Z \left( u_c(p_{e_z}) \cdot \frac{\partial f_2}{\partial p_{e_z}} \right)^2}$$

où :

$\frac{\partial f_1}{\partial p_{i_y}}$ ,  $\frac{\partial f_2}{\partial p_{e_z}}$  sont les dérivées partielles correspondantes des fonctions pour le calcul de  $S_i$  et  $S_e$  ;

$u_c(p_{i_y})$ ,  $u_c(p_{e_z})$  sont les incertitudes types composées correspondantes pour les paramètres  $p_{i_y}$  et  $p_{e_z}$ .

$$u_c(p_{i_y}) = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^V (p_{i_{y_v}} - \bar{p}_{i_y})^2}{V \cdot (V - 1)}} + u_B(p_{i_y})$$

$$\bar{p}_{i_y} = \frac{\sum_{v=1}^V p_{i_{y_v}}}{V}$$

où :

V est le nombre de mesures réalisées pour déterminer la valeur moyenne du paramètre  $p_{i_y}$  ;

$p_{i_{y_v}}$  est la valeur mesurée du paramètre  $p_{i_y}$  ;

$u_B(p_{i,y})$  est l'incertitude type du paramètre  $p_{i,y}$ , établie au moyen d'une évaluation de type B (pour plus de détails sur les méthodes et outils de détermination de l'incertitude selon l'évaluation de type B, se reporter au chapitre 4.3 du Guide ISO/CEI 98-3:2008).

On détermine  $\overline{p_{e_z}}$  et  $u_c(p_{e_z})$  de la même manière que  $\overline{p_{i,y}}$  et  $u_c(p_{i,y})$ .

L'erreur sur  $W$  n'exède pas +1 %, bien que certaines stations d'essais utilisent un matériel conduisant à une erreur supérieure.

La température est mesurée avec une précision absolue de  $\pm 0,1$  °C. La mesure de la différence de température ( $T_e - T_i$ ) de l'ordre de 20 K est donc faite avec une erreur de  $2 \times (\pm 0,5 \%)$ , soit  $\pm 1 \%$ .

L'erreur globale admissible est donc de  $\varepsilon = \pm \sqrt{0,0003} = 0,017$ , soit  $\pm 1,7 \%$ . L'erreur maximale admissible est de  $e_m = \pm 3 \%$ .

3. D'autres erreurs, dont on n'a pas tenu compte, peuvent avoir une certaine influence sur la valeur exacte du coefficient  $K$ . Ces erreurs sont les suivantes : La précision de la détermination du coefficient  $K$  peut aussi dépendre d'autres incertitudes dont on n'a pas tenu compte :

- Les imprécisions "latentes", dues à des variations admissibles de la température intérieure et extérieure et fonction de l'inertie thermique des parois de l'engin, de la température et du temps ;
- Les ~~erreurs~~ incertitudes dues à la variation de la vitesse d'air à la couche limite et à son influence sur la résistance thermique.

Si les vitesses intérieure et extérieure sont égales, l'~~erreur~~ incertitude élargie possible serait d'environ 2,5 %, entre 1 et 2 m/s, pour un coefficient  $K$  moyen de  $0,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Pour un coefficient  $K$  de  $0,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , cette ~~erreur~~ incertitude élargie atteindrait près de 5 %. Enfin, s'il existe d'importants ponts thermiques, l'influence de la vitesse et de la direction de l'air devient plus nette.

4. Enfin, en raison de l'erreur sur l'estimation de la surface de la caisse, erreur qui, dans la pratique, est difficilement chiffrable lorsqu'il s'agit d'engins non normalisés (cette estimation faisant intervenir des facteurs d'appréciation de nature subjective), on pourrait envisager de déterminer l'erreur de mesure de  $K$  comme étant l'erreur sur la mesure de la puissance globale échangée par degré d'écart de température :

$$\frac{W}{T_e - T_i} = K \cdot S.$$

9. Dans les modèles des procès-verbaux d'essai nos 2 A et 2 B, compléter ce qui concerne l'erreur de détermination du coefficient  $K$  comme suit :

« ~~Erreur maximale de mesure~~ Incertitude de mesure élargie correspondant à l'essai effectué ... % (facteur d'élargissement  $k = \dots$  pour un niveau de confiance de ... % ».

### Exemples de calcul

10. Un exemple de calcul de l'incertitude de mesure du coefficient  $K$ , effectué à l'aide du logiciel Mathcad, figure à l'annexe A du présent document officiel.

### Justification

11. Le présent document plaide pour l'utilisation du terme « incertitude » en lieu et place de l'expression « marge d'erreur », avant tout pour les raisons suivantes :

- Il est d'usage au niveau mondial d'utiliser le terme « incertitude » pour décrire des résultats de mesure (l'expression « marge d'erreur » étant plutôt utilisée en référence aux instruments de mesure) ;
- Le Guide ISO/CEI 98-3:2008, traduit en russe, fait désormais partie des normes nationales de la Fédération de Russie ;

- Le terme « incertitude » est plus facile à utiliser dans la pratique, puisqu'il fait référence à un résultat réellement obtenu (mesuré) en exprimant un degré de doute par rapport à son exactitude, alors que l'erreur a trait à une « valeur vraie » abstraite et inconnaissable ;
- Le Guide ISO/CEI 98-3:2008 établit des règles de détermination de l'incertitude claires et uniformes, notamment en supprimant les différences de principe entre composantes de l'incertitude dues à des effets aléatoires et composantes liées à la correction d'erreurs systématiques, et en prenant en compte les possibles corrélations entre les grandeurs mesurées.

12. L'observation relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 à l'ATP est rendue nécessaire par le fait que le Guide ISO/CEI 98-3:2008 traite uniquement de la classification générale et des méthodes de détermination des incertitudes liées à différents facteurs. Étant donné la grande liberté de choix des modèles mathématiques utilisés lors des mesures, la possibilité de retenir un nombre virtuellement infini de composantes de l'incertitude et la prise en compte des effets des corrélations entre les grandeurs mesurées, les méthodes pouvant être utilisées pour déterminer l'incertitude de mesure du coefficient K sont extrêmement diverses. Sans vouloir aucunement restreindre cette liberté, les experts de la Fédération de Russie souhaiteraient toutefois voir figurer dans le Manuel ATP un certain nombre de recommandations relatives aux principaux aspects de la détermination de l'incertitude de mesure du coefficient K. Ces éléments permettraient notamment d'apprécier de manière fondée les exigences relatives aux classes de précision des instruments de mesure utilisés pour les essais de mesure du coefficient K.

13. Au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 à l'ATP, on remplace l'expression « Erreur maximale de mesure » par l'expression « Incertitude de mesure élargie », correspondant à la notion quantitative la plus proche.

Cela étant, si l'on utilise la notion d'incertitude élargie, il faut indiquer l'intervalle de confiance correspondant au facteur d'élargissement retenu. Le paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 à l'annexe 1 de l'ATP précise le niveau de confiance minimum permettant de résoudre la majorité des questions techniques. Le facteur d'élargissement, que l'on peut également déterminer par divers moyens, est indiqué dans les modèles de procès-verbaux d'essai n<sup>os</sup> 2 A et 2 B, pour permettre de calculer par la suite l'incertitude type composée de la mesure du coefficient K.

Dans l'observation 3 relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 à l'ATP, on remplace le terme « erreur » par « incertitude » (sans préciser de quel type) lorsqu'on fait référence à cette notion dans l'absolu. Dans tous les autres cas, on utilise l'expression « incertitude élargie », pour les raisons exposées plus haut.

14. Par simplicité, on utilise un facteur d'élargissement égal à 2 pour un niveau de confiance de 95 % (ou égal à 3 pour un niveau de confiance de 99 %), car le nombre effectif de degrés de liberté de  $u_c(K)$  est grand et difficile à déterminer (notamment du fait des corrélations). La valeur du facteur d'élargissement est choisie de manière à correspondre approximativement à une courbe de distribution normale des probabilités des valeurs estimées du coefficient K et de  $u_c(K)$ , ce qui est justifié dans les conditions du théorème central limite de la théorie des probabilités. Étant donné que le coefficient K est en dépendance fonctionnelle d'un grand nombre de grandeurs physiques et qu'on utilise leurs valeurs moyennes pour en évaluer les incertitudes, on peut considérer que les probabilités des valeurs estimées du coefficient K et de  $u_c(K)$  suivent une loi de distribution normale.

15. Bien que les méthodes mathématiques utilisées pour calculer l'erreur et l'incertitude soient globalement assez proches, le présent document diffère de celui soumis l'année dernière sur un certain nombre de points importants. En particulier, il prend en compte la dépendance fonctionnelle existant entre des ensembles d'attributs utilisés pour déterminer le coefficient K. Comme le montre l'exemple figurant à l'annexe A du présent document, le calcul des corrélations existant entre les températures extérieure et intérieure de la caisse, ainsi qu'entre la puissance thermique (ou frigorifique) et la température intérieure de la caisse influe de manière significative sur le résultat final du calcul de l'incertitude type composée du coefficient K.

### **Coûts**

16. Il n'y a pas de coûts supplémentaires à prévoir.

### **Faisabilité**

17. Les modifications proposées permettent d'éviter d'éventuels malentendus concernant les exigences de précision en matière de détermination du coefficient K lors des essais des engins de transport spéciaux. Les recommandations formulées concernant les méthodes de détermination des différentes composantes de l'incertitude lors de la mesure du coefficient K permettront de renforcer la confiance mutuelle entre les Parties contractantes.

### **Applicabilité**

18. L'introduction des précisions proposées concernant l'utilisation de l'incertitude élargie de la mesure du coefficient K des engins de transport spéciaux ne devrait poser aucun problème.

## Exemple de calcul de l'incertitude de détermination du coefficient K d'un wagon isotherme

### 1 Données de base

Puissance des dispositifs de chauffage électrique (sans ventilateurs) [QD], en W, température à l'intérieur [TiD] et à l'extérieur [TeD] de la caisse, en °C :

1 852,7	7,1	7,2	7,0	6,9	7,2	7,2	6,7	6,8	7,5	7,5	6,8	7,7
1 829,7	7,1	7,2	6,9	6,8	7,2	7,2	6,8	6,8	7,5	7,5	6,9	7,7
1 850,6	7,1	7,2	7,0	6,8	7,3	7,2	6,7	6,8	7,5	7,5	6,9	7,8
1 835,9	7,1	7,1	7,0	6,9	7,2	7,2	6,7	6,7	7,5	7,4	6,9	7,7
1 856,9	7,0	7,1	6,9	6,9	7,2	7,1	6,7	6,7	7,4	7,4	6,8	7,7
1 840,0	7,1	7,1	6,9	6,9	7,2	7,1	6,7	6,8	7,4	7,5	6,8	7,8
1 854,8	7,0	7,1	6,9	6,8	7,2	7,1	6,7	6,8	7,4	7,5	6,8	7,7
1 829,7	7,0	7,1	6,9	6,8	7,2	7,1	6,7	6,7	7,5	7,4	6,9	7,7
1 838,0	7,0	7,1	6,9	6,8	7,2	7,1	6,7	6,7	7,4	7,4	6,8	7,7
1 856,9	7,1	7,1	6,9	6,8	7,2	7,2	6,7	6,7	7,5	7,5	6,8	7,7
1 833,8	7,0	7,1	6,9	6,8	7,2	7,1	6,7	6,7	7,4	7,5	6,8	7,7
1 850,6	7,1	7,1	6,7	6,6	7,2	7,1	6,7	6,8	7,4	7,5	6,6	7,8
1 821,3	7,0	7,1	6,9	6,8	7,2	7,1	6,7	6,7	7,4	7,4	6,7	7,7
1 836,0	7,0	7,1	6,7	6,6	7,2	7,0	6,5	6,6	7,3	7,4	6,6	7,7
1 817,2	7,0	7,1	6,7	6,6	7,1	7,0	6,6	6,6	7,3	7,4	6,7	7,7
1 842,2	6,9	7,0	6,7	6,6	7,1	7,0	6,6	6,7	7,4	7,4	6,7	7,7
1 823,4	6,9	7,0	6,5	6,6	7,1	6,9	6,6	6,6	7,3	7,3	6,6	7,6
1 817,2	6,9	7,0	6,6	6,6	7,0	6,9	6,5	6,5	7,2	7,3	6,6	7,6
1 842,2	6,8	6,9	6,6	6,6	6,9	6,8	6,4	6,5	7,2	7,2	6,6	7,6
1 810,9	6,8	6,9	6,5	6,6	6,9	6,8	6,4	6,5	7,2	7,3	6,5	7,5
1 831,8	6,7	6,9	6,5	6,5	6,9	6,8	6,5	6,5	7,1	7,2	6,6	7,5
1 798,4	6,7	6,8	6,4	6,5	6,8	6,8	6,5	6,5	7,1	7,2	6,4	7,5
1 821,3	6,7	6,8	6,3	6,4	6,9	6,7	6,4	6,5	7,1	7,2	6,4	7,5
1 802,5	6,7	6,8	6,3	6,4	6,8	6,7	6,4	6,4	7,1	7,2	6,4	7,4
QD := 1 821,3	TeD := 6,7	6,8	6,4	6,4	6,8	6,8	6,3	6,4	7,1	7,1	6,5	7,4
1 794,2	6,7	6,8	6,3	6,4	6,8	6,7	6,4	6,4	7,0	7,1	6,4	7,4
1 810,9	6,7	6,8	6,4	6,5	6,8	6,7	6,4	6,4	7,1	7,2	6,5	7,4
1 785,8	6,7	6,8	6,3	6,4	6,8	6,7	6,4	6,4	7,1	7,1	6,4	7,5
1 779,7	6,7	6,8	6,3	6,4	6,8	6,7	6,3	6,4	7,1	7,1	6,3	7,3
1 798,3	6,6	6,7	6,3	6,4	6,7	6,7	6,4	6,4	7,0	7,1	6,4	7,4
1 771,3	6,7	6,8	6,2	6,3	6,8	6,7	6,3	6,3	6,9	7,0	6,3	7,4
1 802,4	6,7	6,7	6,2	6,3	6,7	6,6	6,3	6,4	7,0	7,1	6,3	7,3
1 783,7	6,6	6,7	6,3	6,4	6,7	6,6	6,2	6,3	7,0	7,0	6,4	7,4
1 813,0	6,8	6,8	6,3	6,4	6,9	6,8	6,4	6,4	7,1	7,1	6,4	7,4
1 777,5	6,7	6,8	6,3	6,4	6,7	6,7	6,4	6,4	7,0	7,1	6,4	7,3
1 785,8	6,8	6,8	6,3	6,3	6,8	6,8	6,4	6,4	7,0	7,1	6,4	7,4
1 806,7	6,7	6,8	6,2	6,4	6,8	6,7	6,4	6,5	7,1	7,1	6,3	7,4
1 777,5	6,8	6,8	6,3	6,4	6,9	6,7	6,4	6,4	7,1	7,1	6,4	7,5
1 798,4	6,8	6,8	6,4	6,5	6,9	6,8	6,4	6,5	7,2	7,2	6,5	7,5
1 771,2	6,9	6,9	6,3	6,4	6,9	6,9	6,4	6,5	7,2	7,2	6,4	7,5
1 794,2	6,9	6,9	6,4	6,5	7,0	6,9	6,5	6,5	7,3	7,2	6,4	7,5
1 781,6	6,9	7,0	6,5	6,5	7,0	6,9	6,5	6,5	7,2	7,2	6,5	7,6
1 792,1	6,9	7,0	6,4	6,5	7,1	7,0	6,5	6,6	7,2	7,3	6,5	7,6
1 813,0	6,9	7,0	6,4	6,5	7,0	7,0	6,5	6,5	7,3	7,3	6,5	7,6
1 790,1	7,0	7,0	6,5	6,5	7,1	7,0	6,5	6,6	7,2	7,3	6,5	7,6
1 810,9	7,0	7,0	6,4	6,5	7,1	7,0	6,5	6,5	7,2	7,3	6,5	7,7
1 779,6	6,9	7,0	6,4	6,4	7,0	6,9	6,5	6,5	7,2	7,2	6,5	7,6
1 796,2	7,0	7,0	6,4	6,5	7,0	7,0	6,5	6,5	7,2	7,3	6,5	7,6
1 763,0	7,0	7,0	6,4	6,5	7,1	7,0	6,5	6,5	7,3	7,3	6,5	7,7

TiD :=

33,8	33,7	33,6	33,2	34,0	34,1	32,8	33,0	33,2	33,2	32,4	33,6
33,8	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,0	33,2	33,2	32,3	33,6
33,8	33,7	33,6	33,1	34,1	34,1	32,8	33,1	33,2	33,3	32,3	33,7
33,8	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,2	32,4	33,7
33,9	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,4	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,2	32,9	33,1	33,4	33,3	32,4	33,7
33,9	33,8	33,6	33,2	34,1	34,2	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,7
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,2	32,9	33,2	33,3	33,3	32,4	33,7
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,2	32,9	33,2	33,4	33,4	32,4	33,7
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,2	32,9	33,1	33,3	33,3	32,4	33,8
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,2	32,9	33,1	33,4	33,3	32,4	33,8
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,2	32,8	33,2	33,4	33,4	32,4	33,8
33,9	33,8	33,9	33,3	34,1	34,2	32,8	33,1	33,3	33,4	32,4	33,7
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,2	32,9	33,2	33,4	33,3	32,4	33,7
33,9	33,8	33,9	33,3	34,1	34,2	33,0	33,2	33,4	33,4	32,3	33,8
33,9	33,8	33,9	33,3	34,2	34,2	32,9	33,1	33,3	33,4	32,4	33,7
34,0	33,8	33,9	33,2	34,1	34,2	32,9	33,2	33,4	33,3	32,4	33,8
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,3	32,9	33,1	33,4	33,4	32,4	33,7
33,9	33,8	33,9	33,3	34,1	34,3	33,0	33,2	33,4	33,4	32,6	33,7
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,2	32,8	33,2	33,4	33,4	32,6	33,7
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,2	32,8	33,2	33,4	33,3	32,6	33,7
33,9	33,8	33,9	33,3	34,1	34,2	32,9	33,2	33,3	33,3	32,6	33,7
33,9	33,8	33,9	33,3	34,1	34,2	33,0	33,2	33,3	33,4	32,6	33,7
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,2	32,9	33,2	33,3	33,3	32,6	33,7
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,2	32,9	33,2	33,3	33,3	32,6	33,7
33,9	33,8	33,8	33,3	34,1	34,2	32,8	33,1	33,3	33,3	32,6	33,8
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,2	32,8	33,2	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,1	32,7	33,2	33,3	33,3	32,6	33,7
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,2	33,4	33,2	32,6	33,7
33,8	33,8	33,9	33,2	34,1	34,1	32,9	33,2	33,3	33,2	32,6	33,7
33,9	33,7	33,9	33,3	34,1	34,1	32,8	33,2	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,2	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,7
33,9	33,7	33,8	33,3	34,1	34,2	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,7
33,9	33,8	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,2	33,3	33,3	32,3	33,7
33,9	33,8	33,8	33,2	34,1	34,1	32,9	33,2	33,3	33,2	32,4	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,2	33,3	33,3	32,4	33,7
33,9	33,8	33,9	33,2	34,1	34,1	32,9	33,2	33,2	33,2	32,6	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,2	33,2	32,4	33,6
33,8	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,2	33,3	32,3	33,6
33,8	33,7	33,6	33,2	34,1	34,2	32,8	33,1	33,2	33,2	32,4	33,7
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,2	32,3	33,7
33,9	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,8	33,6	33,2	34,1	34,1	32,9	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,8	33,3	34,1	34,1	32,8	33,2	33,3	33,2	32,4	33,7
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,8	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,3	33,3	32,4	33,6
33,9	33,7	33,6	33,2	34,1	34,1	32,8	33,1	33,2	33,3	32,4	33,6

Facteur d'élargissement pour un niveau de confiance de la mesure du coefficient  $K_p = 95\%$  :

$$k := 2$$

Classe de précision de l'instrument de mesure de la puissance électrique consommée, en % du résultat de la mesure :

$$\delta_Q := 1$$

Erreur instrumentale de la mesure de la température à l'intérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta_{Ti} := 0,1$$

Erreur instrumentale de la mesure de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta_{Te} := 0,1$$

Dimensions extérieures de la caisse du wagon :

*Remarque – Les dimensions extérieures de la caisse du wagon sont tirées de la documentation technique. L'erreur admissible est égale à la moitié de l'unité du dernier chiffre du nombre donnant la valeur de ce paramètre.*

Longueur, longueur moyenne et erreur admise, en m :

$$LeD := 15,750$$

$$mLe := \text{mean}(LeD) = 15,750$$

$$\Delta_{Le} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

Largeur, largeur moyenne et erreur admise, en m :

$$BeD := 2,790$$

$$mBe := \text{mean}(BeD) = 2,790$$

$$\Delta_{Be} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

Hauteur de la paroi latérale, valeur moyenne et erreur admise, en m :

$$HeD := 2,915$$

$$mHe := \text{mean}(HeD) = 2,915$$

$$\Delta_{He} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

Hauteur de l'axe longitudinal central, valeur moyenne et erreur admise, en m :

$$HHeD := 3,323$$

$$mHHe := \text{mean}(HHeD) = 3,323$$

$$\Delta_{HHe} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

Dimensions intérieures de la caisse du wagon (espace de chargement) :

*Remarque – Les dimensions intérieures de la caisse du wagon sont tirées des résultats des mesures (mesures directes effectuées à de multiples reprises avec le même niveau de précision) en différents points de la caisse. L'erreur instrumentale retenue est égale à 0,005 m (la moitié d'une subdivision de la jauge à ruban utilisée pour prendre les mesures). Pour mesurer la longueur de la caisse du wagon, supérieure à la longueur de la jauge à ruban, on a effectué deux mesures successives dont on a additionné les résultats ; on a donc multiplié par 2 la valeur de l'erreur retenue.*

Erreur instrumentale de la jauge de mesure, en m :

$$\Delta_{\text{tape}} := \frac{10^{-2}}{2} = 0,005$$

Longueur, longueur moyenne et erreur de mesure, en m :

$$LiD := (15,395 \ 15,405 \ 15,400 \ 15,400)$$

$$mLi := \text{mean}(LiD) = 15,400$$

$$\Delta\_Li := 2 \cdot \Delta\_tape = 0,010$$

Largeur, largeur moyenne et erreur de mesure, en m :

$$BiD := (2,455 \ 2,450 \ 2,455 \ 2,455)$$

$$mBi := \text{mean}(BiD) = 2,454$$

$$\Delta\_Bi := \Delta\_tape = 0,005$$

Hauteur de la paroi latérale, valeur moyenne et erreur de mesure, en m :

$$HiD := (2,640 \ 2,630 \ 2,640 \ 2,630)$$

$$mHi := \text{mean}(HiD) = 2,635$$

$$\Delta\_Hi := \Delta\_tape = 0,005$$

Hauteur de l'axe longitudinal central, valeur moyenne et erreur de mesure, en m :

$$HHiD := (2,905 \ 2,900)$$

$$mHHi := \text{mean}(HHiD) = 2,902$$

$$\Delta\_HHi := \Delta\_tape = 0,005$$

Calcul de la puissance thermique :

Longueur du câble électrique entre le cadran de lecture des résultats et la sonde de mesure placée à l'intérieur de l'engin de transport, en m :

$$L\_line := 60 - \frac{mLi}{2}$$

Résistivité du conducteur du câble électrique, en ohm.mm<sup>2</sup>/m :

$$\rho := 0,0175$$

Tension de calcul, en V :

$$U := 220$$

$$s := 2,5$$

Section du conducteur du câble électrique, en mm<sup>2</sup> :

Calcul des valeurs de la puissance thermique, en W :

$$WD := \left[ QD \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot QD \cdot L\_line \cdot \rho}{U^2 \cdot s} \right) \right] =$$

1 800,8
1 779,1
1 798,8
1 784,9
1 804,7
1 788,8
1 802,8
1 779,1
1 786,9
1 804,7
1 782,9
1 798,8
...

## 2 Détermination de la surface moyenne de transfert thermique de la caisse du wagon et de son incertitude type composée

Incertitude type de la longueur intérieure de la caisse, en m, établie au moyen d'une évaluation de type A :

$$uA\_Li := \sqrt{\frac{\sum (LiD^T - nLi)^2}{\text{cols}(LiD) \cdot (\text{cols}(LiD) - 1)}} = 0,0020$$

Incertitude type de la longueur intérieure de la caisse, en m, établie au moyen d'une évaluation de type B :

$$uB\_Li := \frac{\Delta\_Li}{\sqrt{3}} = 0,0058$$

Incertitude type composée de la longueur intérieure de la caisse du wagon :

$$uC\_Li := \sqrt{uA\_Li^2 + uB\_Li^2} = 0,0061$$

même pour la largeur, la hauteur de la paroi latérale et la hauteur de l'axe longitudinal central du wagon, en m :

$$uA\_Bi := \sqrt{\frac{\sum (BiD^T - nBi)^2}{\text{cols}(BiD) \cdot (\text{cols}(BiD) - 1)}} = 0,0012 \quad uB\_Bi := \frac{\Delta\_Bi}{\sqrt{3}} = 0,0029 \quad uC\_Bi := \sqrt{uA\_Bi^2 + uB\_Bi^2} = 0,0031$$

$$uA\_Hi := \sqrt{\frac{\sum (HiD^T - nHi)^2}{\text{cols}(HiD) \cdot (\text{cols}(HiD) - 1)}} = 0,0029 \quad uB\_Hi := \frac{\Delta\_Hi}{\sqrt{3}} = 0,0029 \quad uC\_Hi := \sqrt{uA\_Hi^2 + uB\_Hi^2} = 0,0041$$

$$uA\_HHi := \sqrt{\frac{\sum (HHiD^T - nHHi)^2}{\text{cols}(HHiD) \cdot (\text{cols}(HHiD) - 1)}} = 0,0025 \quad uB\_HHi := \frac{\Delta\_HHi}{\sqrt{3}} = 0,0029 \quad uC\_HHi := \sqrt{uA\_HHi^2 + uB\_HHi^2} = 0,0038$$

Incertitude type de la longueur extérieure, de la largeur, de la hauteur de la paroi latérale et de la hauteur de l'axe longitudinal central du wagon, établie au moyen d'une évaluation de type B :

$$uB\_Le := \frac{\Delta\_Le}{\sqrt{3}} = 0,0003 \quad uB\_Be := \frac{\Delta\_Be}{\sqrt{3}} = 0,0003 \quad uB\_He := \frac{\Delta\_He}{\sqrt{3}} = 0,0003 \quad uB\_HHe := \frac{\Delta\_HHe}{\sqrt{3}} = 0,0003$$

Incertitude type composée de la longueur extérieure, de la largeur, de la hauteur de la paroi latérale et de la hauteur de l'axe longitudinal central du wagon :

$$u\tilde{N}\_Le := uB\_Le = 0,0003 \quad uC\_Be := uB\_Be = 0,0003 \quad uC\_He := uB\_He = 0,0003 \quad uC\_HHe := uB\_HHe = 0,0003$$

Calcul de la longueur moyenne de l'arc du toit du wagon et de son incertitude type composée :

*Remarque – On trouvera ci-dessous une formule d'approximation de la longueur moyenne de l'arc du toit du wagon, dans l'hypothèse d'un toit de forme semi-elliptique. L'erreur d'approximation maximale est alors de ~0,3619 % pour une ellipse d'excentricité ~0,979811 (rapport axial ~1/5). La valeur de l'erreur d'approximation est toujours positive.*

Paramètre empirique :  $x := \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{\pi}{2}\right)}$

Fonction de calcul de la longueur de l'arc du toit du wagon :

$$fP(B, H, HH) := 4 \cdot \left[ \left( \frac{B}{2} \right)^x + (HH - H)^x \right]^{\frac{1}{x}}$$

Longueurs moyennes extérieure Pe et intérieure Pi de l'arc du toit du wagon, en m :

$$mPe := fP(mBe, mHe, mHHe) = 6,117$$

$$mPi := fP(mBi, mHi, mHHi) = 5,211$$

Incertitudes types composées de la longueur extérieure  $u_{C\_Pe}$  et de la longueur intérieure  $u_{C\_Pi}$  de l'arc du toit du wagon, en m :

$$u_{C\_Pe} := \sqrt{\left( u_{C\_Be} \frac{d}{dmBe} fP(mBe, mHe, mHHe) \right)^2 + \left( u_{C\_He} \frac{d}{dmHe} fP(mBe, mHe, mHHe) \right)^2 + \dots = 0,0128}$$

$$+ \left( u_{C\_HHe} \frac{d}{dmHHe} fP(mBe, mHe, mHHe) \right)^2 + \frac{\left( \frac{0,3619}{100} \cdot mPe \right)^2}{3}$$

$$u_{C\_Pi} := \sqrt{\left( u_{C\_Bi} \frac{d}{dmBi} fP(mBi, mHi, mHHi) \right)^2 + \left( u_{C\_Hi} \frac{d}{dmHi} fP(mBi, mHi, mHHi) \right)^2 + \dots = 0,0157}$$

$$+ \left( u_{C\_HHi} \frac{d}{dmHHi} fP(mBi, mHi, mHHi) \right)^2 + \frac{\left( \frac{0,3619}{100} \cdot mPi \right)^2}{3}$$

Détermination de la surface moyenne de transfert thermique de la caisse du wagon :

Fonction de calcul de la surface de la caisse du wagon :

$$fS'(L, B, H, HH, P) := L \cdot B + 2 \cdot (L + B) \cdot H + L \frac{P}{2} + \pi \frac{B}{2} \cdot (HH - H)$$

Fonction de calcul de la surface moyenne de transfert thermique de la caisse du wagon :

$$fS(Le, Be, He, HHe, Pe, Li, Bi, Hi, HHi, Pi) := \sqrt{fS'(Le, Be, He, HHe, Pe) \cdot fS'(Li, Bi, Hi, HHi, Pi)}$$

Surface moyenne de la caisse du wagon, en  $m^2$  :

$$mS := fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) = 186,953$$

Incertitude type composée de la surface moyenne de transfert thermique de la caisse du wagon, en  $m^2$  :

$$u_{C\_S} := \sqrt{\left( u_{\tilde{N}\_Le} \frac{d}{dmLe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_Be} \frac{d}{dmBe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_He} \frac{d}{dmHe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_HHe} \frac{d}{dmHHe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_Li} \frac{d}{dmLi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_Bi} \frac{d}{dmBi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_Hi} \frac{d}{dmHi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_HHi} \frac{d}{dmHHi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_Pe} \frac{d}{dmPe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K + \left( u_{C\_Pi} \frac{d}{dmPi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi) \right)^2 K} = 0,118$$

### 3 Calcul de la puissance thermique moyenne et de son incertitude type composée

Puissance thermique moyenne, en W :

$$\underline{m}W := \text{mean}(WD) = 1762$$

Incertitude type de la puissance thermique, en W, établie au moyen d'une évaluation de type A :

$$u_{A\_W} := \sqrt{\frac{\sum (WD - mW)^2}{\text{rows}(WD) \cdot (\text{rows}(WD) - 1)}} = 3,5$$

Incertitude type de la puissance thermique, en W, établie au moyen d'une évaluation de type B :

$$u_{B\_W} := \frac{\frac{\delta_Q}{100} \cdot \text{mean}(WD)}{\sqrt{3}} = 10,2$$

Incertitude type composée de la puissance thermique, en W :

$$u_{C\_W} := \sqrt{u_{A\_W}^2 + u_{B\_W}^2} = 10,8$$

*Remarque – On ne tiendra pas compte de l'incertitude de la perte de puissance électrique étant donné qu'elle n'a que peu d'incidence sur le résultat final en comparaison des autres incertitudes considérées lors de la détermination du coefficient K.*

4 Calcul de la température moyenne à l'intérieur de la caisse du wagon et de son incertitude type composée

Températures moyennes à l'intérieur de la caisse du wagon, en °C :

$$\begin{array}{l}
 \text{mTiD} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(\text{TiD}) - 1 \\ \text{mTiD}_i \leftarrow \text{mean} \left[ \left( \text{TiD}^T \right)^{\langle i \rangle} \right] \\ \text{return } \text{mTiD} \end{array} \right. \quad \text{mTiD} = \begin{array}{|c|} \hline 33,4 \\ \hline \dots \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Température moyenne à l'intérieur de la caisse du wagon, en °C, dans les limites de l'intervalle de calcul :

$$\text{mTi} := \text{mean} (\text{mTiD}) = 33,5$$

Incertitude type de la température intérieure du wagon (mesurage unique), en K, établie au moyen d'une évaluation de type A :

$$\begin{array}{l}
 \text{uA1\_Ti} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(\text{TiD}) - 1 \\ \text{uA1\_Ti}_i \leftarrow \sqrt{\frac{\sum \left[ \left( \text{TiD}^T \right)^{\langle i \rangle} - \text{mTiD}_i \right]^2}{\text{cols}(\text{TiD}) (\text{cols}(\text{TiD}) - 1)}} \\ \text{return } \max(\text{uA1\_Ti}) \end{array} \right. \quad \text{uA1\_Ti} = 0,16
 \end{array}$$

Incertitude type de la température moyenne à l'intérieur du wagon (série de mesures), en K, établie au moyen d'une évaluation de type A :

$$\text{uA2\_Ti} := \sqrt{\frac{\sum (\text{mTiD} - \text{mTi})^2}{\text{rows}(\text{TiD}) \cdot (\text{rows}(\text{TiD}) - 1)}} = 0,01$$

Incertitude type de la température à l'intérieur du wagon, en K, établie au moyen d'une évaluation de type B :

$$\text{uB\_Ti} := \frac{\Delta\_Ti}{\sqrt{3}} = 0,06$$

Incertitude type composée de la température intérieure du wagon, en K :

$$\text{uC\_Ti} := \sqrt{\text{uA1\_Ti}^2 + \text{uA2\_Ti}^2 + \text{uB\_Ti}^2} = 0,29$$

5 Calcul de la température moyenne à l'extérieur de la caisse du wagon et de son incertitude type composée

Températures moyennes à l'extérieur de la caisse du wagon, en °C :

$$\begin{array}{l}
 \text{mTeD} := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(\text{TeD}) - 1 \\ \text{mTeD}_i \leftarrow \text{mean} \left[ \left( \text{TeD}^T \right)^{\langle i \rangle} \right] \\ \text{return } \text{mTeD} \end{array} \right. \quad \text{mTeD} = \begin{array}{|c|} \hline 7,1 \\ \hline 7,1 \\ \hline 7,2 \\ \hline 7,1 \\ \hline 7,1 \\ \hline 7,1 \\ \hline \dots \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Température moyenne à l'extérieur de la caisse du wagon, en °C, dans les limites de l'intervalle de calcul :

$$\text{mTe} := \text{mean} (\text{mTeD}) = 6,9$$

Incertitude type de la température à l'extérieur de la caisse du wagon (mesurage unique), en K, établie au moyen d'une évaluation de type A :

$$uA1\_Te := \begin{cases} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(TeD) - 1 \\ \quad uA1\_Te_i \leftarrow \sqrt{\frac{\sum \left[ \left( TeD^T \right)^{(i)} - mTeD_i \right]^2}{\text{cols}(TeD) \cdot (\text{cols}(TeD) - 1)}} \\ \text{return } \max(uA1\_Te) \end{cases} \quad uA1\_Te = 0,12$$

Incertitude type de la température moyenne à l'extérieur de la caisse du wagon (série de mesures), en K, établie au moyen d'une évaluation de type A :

$$uA2\_Te := \sqrt{\frac{\sum (mTeD - mTe)^2}{\text{rows}(TeD) \cdot (\text{rows}(TeD) - 1)}} = 0,02$$

Incertitude type de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, en K, établie au moyen d'une évaluation de type B :

$$uB\_Te := \frac{\Delta\_Te}{\sqrt{3}} = 0,06$$

Incertitude type composée de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, en K :

$$uC\_Te := \sqrt{uA1\_Te^2 + uA2\_Te^2 + uB\_Te^2} = 0,27$$

## 6 Évaluation des corrélations

L'analyse des essais réalisés pour mesurer le coefficient K permet de conclure qu'il existe une corrélation (temporelle) entre les séries de mesures suivantes :

- Températures moyennes à l'extérieur et à l'intérieur de la caisse du wagon ;
- Puissance thermique et température moyenne à l'intérieur de la caisse du wagon.

Calcul du coefficient de corrélation entre les températures moyennes à l'extérieur et à l'intérieur de la caisse du wagon :

$$r\_Te\_Ti := \begin{cases} r\_Te\_Ti_0 \leftarrow \text{corr}(mTeD, mTiD) \\ \text{for } i \in 1.. \text{rows}(mTiD) - 1 \\ \quad r\_Te\_Ti_i \leftarrow \text{corr}(mTeD, \text{stack}(\text{submatrix}(mTiD, i, \text{rows}(mTiD) - 1, 0, 0), \text{submatrix}(mTiD, 0, i - 1, 0, 0))) \\ \text{return } \max(r\_Te\_Ti) \end{cases} \quad r\_Te\_Ti = 0,860$$

Calcul du coefficient de corrélation entre la puissance thermique et la température moyenne à l'intérieur de la caisse du wagon :

$$r\_W\_Ti := \begin{cases} r\_W\_Ti_0 \leftarrow \text{corr}(WD, mTiD) \\ \text{for } i \in 1.. \text{rows}(mTiD) - 1 \\ \quad r\_W\_Ti_i \leftarrow \text{corr}(WD, \text{stack}(\text{submatrix}(mTiD, i, \text{rows}(mTiD) - 1, 0, 0), \text{submatrix}(mTiD, 0, i - 1, 0, 0))) \\ \text{return } \max(r\_W\_Ti) \end{cases} \quad r\_W\_Ti = 0,726$$

## 7 Calcul de la valeur moyenne du coefficient K et de son incertitude type composée

Fonction de calcul du coefficient K :

$$fK(W, Ti, Te, S) := \frac{W}{S \cdot (Ti - Te)}$$

Valeur moyenne du coefficient K, en W/(m<sup>2</sup>K) :

$$mK := fK(mW, mTi, mTe, mS) = 0,35$$

Incertitude type composée de la mesure du coefficient K, en W/(m<sup>2</sup>K) :

$$u_{C\_K} := \sqrt{\left( \left( u_{C\_W} \frac{d}{dmW} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + \left( u_{C\_Ti} \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + \left( u_{C\_Te} \frac{d}{dmTe} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 + \left( u_{C\_S} \frac{d}{dmS} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right)^2 \right) K^2 + 2 \cdot \left( \left| \frac{d}{dmTe} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot \left| \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot u_{C\_Te} \cdot u_{C\_Ti} \cdot r_{Te\_Ti} \dots \right) + \left( \left| \frac{d}{dmW} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot \left| \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS) \right| \cdot u_{C\_W} \cdot u_{C\_Ti} \cdot r_{W\_Ti} \right)} = 0,008$$

### 8 Calcul de l'incertitude type élargie de la mesure du coefficient K

$$U\_K := u_{C\_K} \cdot k = 0,017$$

ou en pourcentage :  $\frac{U\_K}{mK} \cdot 100 = 4,7$