

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

Genève, 4-7 octobre 2016

Point 5 b) de l'ordre du jour provisoire

Propositions d'amendements à l'ATP :

Nouvelles propositions

**Complément à l'annexe 1 de l'ATP portant
sur le coefficient global de transmission thermique
des engins de transport spéciaux et introduction
dans le Manuel ATP d'une méthode permettant
de le calculer****Communication de la Fédération de Russie***Résumé***Résumé analytique :**

Conformément au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, la valeur du coefficient global de transmission thermique (coefficient K) de la caisse des engins de transport spéciaux doit être déterminée avec une erreur maximale de mesure de $\pm 10\%$ quand on utilise la méthode de refroidissement intérieur et $\pm 5\%$ quand on utilise la méthode de chauffage intérieur. Cette formulation ne permet pas de savoir exactement de quelle erreur de détermination du coefficient K il s'agit.

On trouve dans le Manuel ATP une observation relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP dans laquelle sont décrites les erreurs susceptibles de se produire lors de la détermination du coefficient K et qui propose également des moyens de les calculer. Ces indications ne sont toutefois pas suffisantes pour qu'on puisse en pratique déterminer ces erreurs de manière claire et univoque.

Mesures à prendre :

Rendre plus précise la formulation du paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP en ce qui concerne les erreurs lors de la détermination du coefficient K.

GE.16-12440 (F) 150816 230816



* 1 6 1 2 4 4 0 *

Merci de recycler



Remplacer l'observation relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP par une autre plus étoffée incluant une méthode permettant de calculer l'erreur lors de la détermination du coefficient K.

Effectuer les modifications correspondantes dans les modèles des procès-verbaux d'essai n^{os} 2 A et 2 B.

Document de référence : Aucun.

Introduction

1. À sa soixante-dixième session, le WP.11 a examiné les propositions du Royaume-Uni concernant des méthodes de calcul des surfaces extérieures des parois des fourgons sans fenêtres pour la partie compartiment de chargement du véhicule.

À la soixante et onzième session, la Fédération de Russie a présenté un document informel qui étend les méthodes proposées par le Royaume-Uni au calcul des surfaces extérieures des parois des wagons de chemin de fer.

Lors de la discussion portant sur ce document informel, les experts de la Fédération de Russie ont jugé nécessaire de donner pour chaque méthode proposée (y compris de calcul de la surface de transfert thermique des caisses des engins de transport spéciaux) une estimation de l'erreur correspondante en indiquant également une méthode permettant de la calculer. Il s'agissait surtout d'atteindre lors des essais visant à déterminer le coefficient K le degré de précision fixé dans l'ATP. Il est ainsi indiqué au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 à l'annexe 1 de l'ATP que la valeur du coefficient K doit être déterminée avec une erreur maximale de mesure de :

± 10 % quand on utilise la méthode de refroidissement intérieur, et

± 5 % quand on utilise la méthode de chauffage intérieur.

Les experts de la Fédération de Russie ont également fait remarquer que la méthode d'essai prescrite dans l'ATP ne donne pas la moindre indication concernant le calcul de l'erreur lors de la détermination du coefficient K. Le Manuel ATP contient une observation relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, mais les indications qu'elle contient ne sont pas suffisantes pour permettre l'interprétation univoque et l'application pratique des méthodes de calcul des erreurs. L'observation en question doit être sensiblement améliorée et complétée par l'ajout d'une méthode correspondante de calcul de l'erreur lors de la détermination de la valeur du coefficient K.

Conscients de la complexité de la question soulevée, les représentants du Groupe de travail ont souhaité examiner les observations formulées au cas où la Fédération de Russie présenterait un document pertinent à la soixante-douzième session.

2. Dans ce contexte, la Fédération de Russie a élaboré sous forme de document officiel une proposition visant à introduire les dispositions pertinentes dans l'ATP et dans le Manuel ATP.

Les experts de la Fédération de Russie proposent ainsi :

D'ajouter au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP une forme d'erreur lors de la détermination du coefficient K ;

D'introduire dans le Manuel ATP la méthode de calcul de l'erreur lors de la détermination du coefficient K dans la procédure d'essai ;

D'apporter les modifications correspondantes dans les modèles des procès-verbaux d'essai n^{os} 2 A et 2 B.

3. La décision d'introduire une méthode de calcul de l'erreur lors de la détermination du coefficient K dans le Manuel ATP et pas dans l'ATP lui-même s'explique par le fait que la méthode proposée ne tient compte que des facteurs principaux et les plus importants, qui entraînent des erreurs au cours des essais. Elle tient également au fait que l'on peut, pour calculer l'erreur lors de la détermination du coefficient K, ne pas utiliser les méthodes mathématiques proposées dans le Manuel ATP mais des moyens complètement différents dont la mise en œuvre peut être justifiée dans certaines circonstances particulières. La méthode proposée peut cependant être appliquée avec succès dans l'écrasante majorité des essais de calcul de la valeur du coefficient K pour les engins de transport spéciaux.

Proposition

4. Modifier le paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP comme suit¹ :

« 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 relative maximale de mesure de $\pm 10\%$ par rapport au résultat obtenu quand on utilise la méthode de refroidissement intérieur et de $\pm 5\%$ quand on utilise la méthode de chauffage intérieur. Pour le calcul de l'erreur lors de la détermination du coefficient K par des méthodes relevant de la théorie des probabilités et de la statistique mathématique, le degré de fiabilité ne doit pas être inférieur à 95 %.

Les données de base et le calcul de l'erreur de détermination du coefficient K doivent être jointes au procès-verbal d'essai, conforme aux modèles n^{os} 2 A et 2 B, de l'engin de transport spécial aux fins de mesure du coefficient K de sa caisse. ».

5. Dans le Manuel ATP, modifier l'observation relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP comme suit² :

« *Observations relatives au paragraphe 2.3.2 :*

1. *Les exemples des erreurs normalement prises en compte par les stations d'essais concernent la température, ~~la puissance absorbée~~ la puissance thermique, qui dépend généralement de la puissance électrique, des dispositifs de chauffage électrique (lorsque la méthode de chauffage intérieur est utilisée) ; la puissance frigorifique (lorsque la méthode de refroidissement intérieur est utilisée et la surface de la caisse.*

La méthode de calcul de l'erreur appliquée habituellement peut être celle de l'erreur globale admissible :

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

ou celle de l'erreur maximale ϵ_m :

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

où :

¹ 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.

² Pour des raisons techniques, les formules ajoutées ne sont pas soulignées.

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'erreur relative lors de la détermination du coefficient K , ε_K , peut être obtenue par le rapport entre l'erreur absolue ΔK et sa valeur (moyenne) calculée \bar{K} . Dans la mesure où il est d'une manière générale très compliqué de déterminer la valeur ΔK , il est préférable d'avoir recours à des méthodes relevant de la théorie des probabilités et de la statistique mathématique, en fixant pour \bar{K} une valeur de l'intervalle de confiance (d'erreur aléatoire) $\Delta_{\bar{K}}$, avec un degré de confiance qui ne soit pas inférieur à 95 %. Dans ce cas :

$$\varepsilon_K = \frac{\Delta K}{\bar{K}} \cdot 100 \cong \frac{\Delta_{\bar{K}}}{\bar{K}} \cdot 100$$

$$\Delta_{\bar{K}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\bar{W}}}{\bar{S} \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{W} \cdot \Delta_{\bar{T}_i}}{\bar{S} \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)^2}\right)^2 + \left(\frac{\bar{W} \cdot \Delta_{\bar{T}_e}}{\bar{S} \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)^2}\right)^2 + \left(\frac{\bar{W} \cdot \Delta_{\bar{S}}}{\bar{S}^2 \cdot (\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2}$$

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 ; de la température extérieure et intérieure de la caisse, en $^{\circ}C$; et de la surface moyenne de la caisse, en m^2 ;

$\Delta_{\bar{W}}$, $\Delta_{\bar{T}_i}$, $\Delta_{\bar{T}_e}$, $\Delta_{\bar{S}}$ sont respectivement les intervalles de confiance (d'erreur aléatoire) de la puissance thermique (ou frigorifique), en W ; de la température extérieure et intérieure de la caisse, en $^{\circ}C$; et de la surface moyenne de la caisse, en m^2 .

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

$$W_k = \eta_k \cdot Q_k$$

$$\Delta_{\bar{W}} = \sqrt{\left(t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\bar{W} - W_k)^2}{n \cdot (n-1)}}\right)^2 + (\alpha \cdot \Delta_Q)^2}$$

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

$$\Delta_{\bar{T}_i} = \sqrt{\left(t_{\alpha, (n \cdot l)} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^l (\bar{T}_i - T_{i,k})^2}{(n \cdot l) \cdot (n \cdot l - 1)}}\right)^2 + (\alpha \cdot \Delta_{T_i})^2}$$

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

$$\Delta_{\overline{T_e}} = \sqrt{\left(t_{\alpha, (n \cdot m)} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m (\overline{T_e} - T_{e,j,k})^2}{(n \cdot m) \cdot (n \cdot m - 1)}} \right)^2 + (\alpha \cdot \Delta_{T_e})^2}$$

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

où :

Q_k, W_k sont respectivement les valeurs mesurées de la puissance électrique et de la puissance thermique (ou frigorifique) consommées, mesurées lors du relevé lors de la k-ième mesure (pendant la période de calcul à la fin de la période de stabilisation ce sont n mesures qui ont été effectuées en tout), en W ;

η_k est la performance des dispositifs de chauffage électrique compte tenu des pertes dans les conducteurs (quand on utilise la méthode de chauffage intérieur) ou dans les échangeurs de chaleurs (quand on utilise la méthode de refroidissement intérieur) lors de la mesure, en % ;

$T_{i,k}, T_{e,j,k}$ 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 de transport spécial (au total m instruments de même précision participent simultanément au même relevé de la température), en °C ;

$\Delta_{T_i}, \Delta_{T_e}, \Delta_Q$ sont les erreurs instrumentales de mesure de la température, respectivement à l'intérieur et à l'extérieur de la caisse de l'engin de transport soumis à l'essai, K, ainsi que de la puissance électrique consommée, en W ;

$t_{\alpha, n}, t_{\alpha, (n \cdot l)}, t_{\alpha, (n \cdot m)}$ sont les valeurs du coefficient de Student pour le degré de confiance donné α ($\alpha \geq 0,95$) et le nombre correspondant de mesures des grandeurs physiques effectuées ;

$\overline{S_i}, \overline{S_e}$ sont respectivement les surfaces moyennes intérieure et extérieure calculées de la caisse de l'engin de transport soumis à l'essai (sans tenir compte de la gaufre), en m² ;

$\Delta_{\overline{S_i}}, \Delta_{\overline{S_e}}$ sont respectivement les intervalles de confiance (erreurs aléatoires) de la surface intérieure et extérieure de la caisse de l'engin de transport soumis à l'essai, en m².

Quand on utilise la méthode de chauffage intérieur, on peut calculer η_k en prenant comme hypothèse que la puissance électrique des dispositifs de chauffage électrique se transforme pratiquement sans déperdition en puissance thermique. Les déperditions d'énergie ne se produisent alors que dans les câbles et peuvent être calculées par la formule :

$$\eta_k = 1 - \frac{2 \cdot Q_k \cdot L_{\text{line}} \cdot \rho}{U^2 \cdot S}$$

où :

Q_k est la valeur de la puissance électrique consommée lors de la mesure, en W ;

L_{line} est la longueur du câble électrique entre l'instrument de mesure et l'emplacement de l'instrument de transformation correspondant, en m ;

ρ est la résistivité du conducteur du câble électrique, en ohm/cm²/m ;

U est la tension de calcul, en V :

s est la section du conducteur du câble électrique, en mm².

Quand on utilise la méthode de refroidissement intérieur, le calcul de η_x doit tenir compte du système de refroidissement effectivement à l'œuvre et des dispositifs techniques utilisés à cet effet.

Les erreurs instrumentales peuvent être indiquées par le fabricant d'instruments de mesure en valeur absolue ; elles sont alors utilisées dans les formules de calcul directement ou comme classe de précision. Dans le second cas l'erreur doit être normée au résultat de la mesure :

$$\Delta_x = \frac{\delta}{100} \cdot x$$

ou indiquées sous la forme ci-dessous :

$$\Delta_x = \frac{\delta}{100} \cdot X$$

où :

δ est la classe de précision indiquée par le fabricant de l'instrument de mesure, en % :

x est la valeur de la grandeur physique mesurée. Si cette valeur est déterminée par une série de mesures dont on prend la moyenne, il convient de prendre la valeur la plus élevée de la série comme valeur calculée de x :

X est la valeur maximale admissible de la grandeur physique mesurée x dans la plage de fonctionnement donnée de l'instrument de mesure.

2. Dans des conditions normales d'essai, on peut mesurer S à moins de +1 % \bar{S}_i et \bar{S}_e avec une grande précision. Cependant, il existe des cas où il est impossible d'atteindre cette précision. Pour mesurer les erreurs de \bar{S}_i et \bar{S}_e , sur lesquels on se base pour déterminer la surface moyenne de la caisse, \bar{S} , on peut utiliser la méthode suivante.

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

$$\bar{S}_i = f_1(\bar{p}_{i1}, \bar{p}_{i2}, \dots, \bar{p}_{iy})$$

$$\bar{S}_e = f_2(\bar{p}_{e1}, \bar{p}_{e2}, \dots, \bar{p}_{ez})$$

alors :

$$\Delta_{\bar{S}_i} = \sqrt{\sum_{y=1}^Y \left(\Delta_{\bar{p}_{iy}} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \bar{p}_{iy}} \right)^2}$$

$$\Delta_{\bar{S}_e} = \sqrt{\sum_{z=1}^Z \left(\Delta_{\bar{p}_{ez}} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial \bar{p}_{ez}} \right)^2}$$

où :

$\frac{\partial f_1}{\partial \bar{p}_{iy}}$, $\frac{\partial f_2}{\partial \bar{p}_{ez}}$ sont les dérivées partielles correspondantes des fonctions pour le calcul de \bar{S}_i et \bar{S}_e :

$\Delta_{\bar{p}_{iy}}$, $\Delta_{\bar{p}_{ez}}$ sont les intervalles de confiance correspondants pour les paramètres \bar{p}_{iy} et \bar{p}_{ez} .

$$\bar{p}_{iy} = \frac{\sum_{v=1}^V p_{iyv}}{V}$$

$$\Delta_{\bar{p}_{iy}} = \sqrt{\left(t_{\alpha,V} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^V (\bar{p}_{iy} - p_{iyv})^2}{V \cdot (V-1)}} \right)^2 + (\alpha \cdot \Delta_{p_{iy}})^2}$$

où :

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

p_{iyv} est la valeur mesurée du paramètre p_{iy} ;

$t_{\alpha,V}$ est la valeur du coefficient de Student pour le degré de confiance α donné ($\alpha \geq 0,95$) et le nombre V correspondant de mesures du paramètre p_{iy} effectuées ;

$\Delta_{p_{iy}}$ est l'erreur de l'instrument de mesure du paramètre p_{iy} .

On détermine \bar{p}_{ez} et $\Delta_{\bar{p}_{ez}}$ de la même manière que \bar{p}_{iy} et $\Delta_{\bar{p}_{iy}}$.

Les valeurs des paramètres \bar{p}_{iy} et \bar{p}_{ez} peuvent être considérées comme données (par la documentation technique de l'engin de transport spécial). Dans ce cas :

$$\Delta_{\bar{p}_{iy}} = \alpha \cdot d_{p_{iy}}$$

$$\Delta_{\bar{p}_{ez}} = \alpha \cdot d_{p_{ez}}$$

où :

$d_{p_{iy}}$, $d_{p_{ez}}$ équivalent à la moitié du dernier chiffre du nombre donnant la valeur de ce paramètre.

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

La température est mesurée avec une précision absolue de $\pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$. 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 $\varepsilon = \pm \sqrt{0,0003} = \pm 0,017$, 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 :

a) 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 ;

b) Les erreurs dues à la variation de la vitesse de d'air à la couche limite et à son influence sur la résistance thermique.

Si les vitesses intérieure et extérieure sont égales, l'erreur possible serait d'environ 2,5 %, entre 1 et 2 m/s, pour un coefficient K moyen de 0,4 W/m².K. Pour un coefficient K de 0,7 W/m².K, cette erreur 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 :*

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

6. Dans les modèles des procès-verbaux d'essai n^{os} 2 A et 2 B, compléter ce qui concerne l'erreur de détermination du coefficient K, comme suit :

« Erreur ~~maximale relative de mesure~~ correspondant à l'essai effectué ... % de la valeur obtenue, fiabilité ... % ».

Exemples de calcul

7. On trouvera dans l'annexe A du présent document un exemple de calcul d'erreur lors de la détermination du coefficient K d'un wagon isotherme effectuée en 2015 par la laboratoire de gestion des transports des produits alimentaires et denrées périssables de la société NIIAS (Fédération de Russie) en utilisant Mathcad.

Justification

8. L'erreur de la mesure est un écart du résultat mesuré par rapport à la valeur exacte de la grandeur physique. La précision de la mesure est l'inverse de l'erreur de la mesure.

9. On distingue :

L'erreur absolue, qui la différence entre la valeur physique exacte et la valeur physique mesurée ;

L'erreur relative, qui est le rapport entre l'erreur absolue et soit la valeur exacte soit le résultat de la mesure ;

L'erreur réduite, qui le rapport entre l'erreur absolue et une certaine valeur normalisée (par exemple la plus grande possible) de la grandeur physique mesurée.

Les erreurs relative et réduite sont généralement exprimées en %.

10. L'expression en pourcentage de l'erreur de détermination du coefficient K dans le texte actuel du paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP laisse supposer qu'il est question soit d'une des variantes de l'erreur relative, soit de l'erreur réduite. L'expression quantitative des différentes formes d'erreurs sera alors également différente.

Il ressort de ce qui précède qu'il importe de préciser la forme de l'erreur au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP.

11. Une analyse plus approfondie montre qu'il n'est pas réaliste d'utiliser les formes de l'erreur réduite et aussi de l'erreur relative par rapport à la valeur exacte du coefficient K.

En effet, il peut sembler au premier abord que la valeur maximale du coefficient K retenue pour telle ou telle catégorie d'engin de transport spécial en essai pourrait servir de valeur normalisée. Toutefois, l'erreur réduite est généralement mentionnée pour certaines *constructions* d'instruments de mesure, ce qui signifie que cette forme d'erreur dépend des particularités de construction de ces instruments et pas de la nature des mesures ni des grandeurs mesurées. La valeur du coefficient K n'est pas déterminée par des mesures directes mais elle est calculée à l'aide d'une fonction. Toutes les grandeurs physiques impliquées dans cette fonction sont mesurées, d'une manière générale, à l'aide d'instruments dont la précision est indiquée en valeurs absolues ou relatives (mais pas réduites).

Une erreur relative calculée comme étant le rapport entre l'erreur absolue et la valeur exacte suppose que la valeur exacte du coefficient K puisse être en principe obtenue. Compte tenu de la complexité de la détermination du coefficient K (par un moyen indirect utilisant des grandeurs physiques déterminées par toute une série de mesures directes maintes fois répétées avec la même précision), on peut constater qu'il est presque impossible dans de telles conditions d'obtenir la valeur exacte du coefficient K.

Au vu de ce qui précède, il a été proposé de préciser au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP que la détermination du coefficient K se fait avec des valeurs de *l'erreur relative par rapport au résultat obtenu* qui ne sont pas supérieures aux valeurs mentionnées dans le texte.

12. La valeur du coefficient K n'est pas mesurée directement mais calculée à partir de mesures d'autres paramètres physiques (de la puissance de chauffage ou de refroidissement, en W ; de la température à l'extérieur, T_e et à l'intérieur, T_i de la caisse de l'engin de transport spécial ; et de la surface moyenne de la caisse, S), par la formule suivante :

Lorsqu'on utilise la méthode de chauffage intérieur :

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

Lorsqu'on utilise la méthode de refroidissement intérieur :

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

Puisque la valeur du coefficient K est déterminée de manière indirecte, son erreur est calculée comme étant la somme des produits des dérivées partielles des paramètres de la relation fonctionnelle correspondante pour les erreurs de détermination de ces paramètres :

$$\Delta_K = \sqrt{\left(\Delta_W \cdot \frac{\partial K}{\partial W}\right)^2 + \left(\Delta_S \cdot \frac{\partial K}{\partial S}\right)^2 + \left(\Delta_{T_i} \cdot \frac{\partial K}{\partial T_i}\right)^2 + \left(\Delta_{T_e} \cdot \frac{\partial K}{\partial T_e}\right)^2}$$

Le texte modifié de l'observation concernant le paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP contient la formule correspondante représentée ci-dessus après une série de transformations analytiques.

13. Le nombre de facteurs qui influent sur la précision de mesure des paramètres physiques intervenant dans la relation fonctionnelle permettant de déterminer le coefficient K est assez grand et tout classement des erreurs est dans une certaine mesure conditionnel.

Dans la méthode proposée pour calculer l'erreur de détermination du coefficient K il manque l'analyse et la prise en compte des erreurs systématiques. On estime que les erreurs systématiques ou leurs causes peuvent être repérées et éliminées. On considère que les personnes qui procèdent aux mesures sont suffisamment compétentes pour le faire.

Il en va de même pour les erreurs grossières (maladresses). Elles peuvent être relativement facilement repérées et éliminées lors de la détermination de la valeur du coefficient K.

En fait, la méthode de calcul de l'erreur de détermination du coefficient K ne concerne que les erreurs aléatoires qui modifient les résultats d'une fois à l'autre lorsque les essais sont effectués de la même manière et dans les mêmes conditions.

Dans le cadre de la mesure des paramètres physiques utilisés pour déterminer le coefficient K, nous considérons l'erreur aléatoire comme étant la somme de l'erreur aléatoire lors des mesures directes uniques Δ_{SING} et de l'erreur aléatoire lors de mesures directes maintes fois répétées avec le même niveau de précision, Δ_{REP} . On utilise la loi de l'addition des valeurs d'erreur indépendantes :

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{SING}}^2 + \Delta_{\text{REP}}^2}$$

14. Il n'est théoriquement pas possible de prédire l'ampleur d'une erreur aléatoire pour une seule mesure. Compte tenu du fait que les valeurs des grandeurs physiques utilisées pour déterminer le coefficient K sont obtenues sur la base de la médiation des données de (trop) nombreuses mesures d'égale précision destinées à déterminer l'erreur du résultat obtenu (valeur estimée de l'erreur aléatoire cumulée) il est utile d'utiliser les méthodes mathématiques connues de la théorie des probabilité et de la statistique mathématique. Lorsqu'on procède à un assez grand nombre de mesures il est toujours possible d'indiquer des limites à l'intérieur desquelles se trouvera la valeur exacte de la grandeur mesurée.

Toute erreur aléatoire peut être évaluée avec une certaine probabilité de confiance (de fiabilité), dont il faut déterminer le niveau. Exiger que le coefficient K soit déterminé avec *l'erreur maximale* n'a en l'occurrence aucun sens. Il vaut mieux fixer un certain niveau de *fiabilité*. Dans la mesure où la détermination du coefficient K s'effectue dans le but d'évaluer l'état de l'isolation des engins de transport spéciaux, on a retenu la valeur de 95 % comme niveau de fiabilité acceptable.

15. Les erreurs aléatoires lors de mesures directes maintes fois répétées avec le même niveau de précision sont de nature continue et ont de très nombreuses causes aléatoires qui agissent de manières différentes lors de chaque mesure. On peut donc les considérer comme une variable aléatoire. En vertu du théorème central limite, la variable aléatoire formée par la somme de quelques processus aléatoires indépendants obéit à la loi de distribution normale. Sur la base de ce qui précède, nous admettons que les erreurs aléatoires lors de mesures répétées maintes fois, avec le même niveau de précision, des paramètres physiques utilisées pour déterminer le coefficient K obéissent à la loi de distribution normale.

16. Vu que les valeurs exactes du coefficient K et des paramètres physiques sur la base desquels il est déterminé sont inconnues, l'estimation de l'erreur s'effectue aux valeurs moyennes des paramètres définis. Dans ce cas, pour trouver les limites des intervalles de confiance des valeurs (moyennes) obtenues pour les paramètres définis il convient d'utiliser non pas les quantiles de la distribution normale mais les coefficients de Student correspondants, qui servent à déterminer le niveau de probabilité de confiance (de fiabilité) et le nombre de mesures effectuées.

Coûts

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

Faisabilité

18. 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 précises contenues dans le manuel ATP en ce qui concerne les méthodes de calcul des erreurs réduisent le risque que des engins de transport spéciaux soient classés de manière erronée, ce qui ne peut que renforcer la confiance mutuelle entre les Parties contractantes.

Applicabilité

19. L'introduction des précisions proposées concernant les erreurs de détermination du coefficient K des engins de transport spéciaux et la méthode permettant de les mesurer ne devrait poser aucun problème.

Annexe A

Exemple de calcul de l'erreur de détermination du coefficient global de transmission thermique de la caisse d'un wagon isotherme effectuée en 2015 par la laboratoire de gestion des transports des produits alimentaires et denrées périssables de la société NIIAS (impression d'un document Mathcad)

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 :

1852.7	33.8 33.7 33.6 33.2 34.0 34.1 32.8 33.0 33.2 33.2 32.4 33.6	7.1 7.2 7.0 6.9 7.2 7.2 6.7 6.8 7.5 7.5 6.8 7.7
1829.7	33.8 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.0 33.2 33.2 32.3 33.6	7.1 7.2 6.9 6.8 7.2 7.2 6.8 6.8 7.5 7.5 6.9 7.7
1850.6	33.8 33.7 33.6 33.1 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.3 32.3 33.7	7.1 7.2 7.0 6.8 7.3 7.2 6.7 6.8 7.5 7.5 6.9 7.8
1835.9	33.8 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.2 32.4 33.7	7.1 7.1 7.0 6.9 7.2 7.2 6.7 6.7 7.5 7.4 6.9 7.7
1856.9	33.9 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6	7.0 7.1 6.9 6.9 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.8 7.7
1840.0	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.4 33.3 32.4 33.6	7.1 7.1 6.9 6.9 7.2 7.1 6.7 6.8 7.4 7.5 6.8 7.8
1854.8	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.2 32.9 33.1 33.4 33.3 32.4 33.7	7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.8 7.4 7.5 6.8 7.7
1829.7	33.9 33.8 33.6 33.2 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7	7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.5 7.4 6.9 7.7
1838.0	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.4 33.7	7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.8 7.7
1856.9	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.4 33.4 32.4 33.7	7.1 7.1 6.9 6.8 7.2 7.2 6.7 6.7 7.5 7.5 6.8 7.7
1833.8	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.1 33.3 33.3 32.4 33.8	7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.5 6.8 7.7
1850.6	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.1 33.4 33.3 32.4 33.8	7.1 7.1 6.7 6.6 7.2 7.1 6.7 6.8 7.4 7.5 6.6 7.8
1821.3	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.8 33.2 33.4 33.4 32.4 33.8	7.0 7.1 6.9 6.8 7.2 7.1 6.7 6.7 7.4 7.4 6.7 7.7
1836.0	33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.4 32.4 33.7	7.0 7.1 6.7 6.6 7.2 7.0 6.5 6.6 7.3 7.4 6.6 7.7
1817.2	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.4 33.3 32.4 33.7	7.0 7.1 6.7 6.6 7.1 7.0 6.6 6.6 7.3 7.4 6.7 7.7
1842.2	33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 33.0 33.2 33.4 33.4 32.3 33.8	6.9 7.0 6.7 6.6 7.1 7.0 6.6 6.7 7.4 7.4 6.7 7.7
1823.4	33.9 33.8 33.9 33.3 34.2 34.2 32.9 33.1 33.3 33.4 32.4 33.7	6.9 7.0 6.5 6.6 7.1 6.9 6.6 6.6 7.3 7.3 6.6 7.6
1817.2	34.0 33.8 33.9 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.4 33.3 32.4 33.8	6.9 7.0 6.6 6.6 7.0 6.9 6.5 6.5 7.2 7.3 6.6 7.6
1842.2	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.3 32.9 33.1 33.4 33.4 32.4 33.7	6.8 6.9 6.6 6.6 6.9 6.8 6.4 6.5 7.2 7.2 6.6 7.6
1810.9	33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.3 33.0 33.2 33.4 33.4 32.6 33.7	6.8 6.9 6.5 6.6 6.9 6.8 6.4 6.5 7.2 7.3 6.5 7.5
1831.8	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.2 33.4 33.4 32.6 33.7	6.7 6.9 6.5 6.5 6.9 6.8 6.5 6.5 7.1 7.2 6.6 7.5
1798.4	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.2 33.4 33.3 32.6 33.7	6.7 6.8 6.4 6.5 6.8 6.8 6.5 6.5 7.1 7.2 6.4 7.5
1821.3	33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7	6.7 6.8 6.3 6.4 6.9 6.7 6.4 6.5 7.1 7.2 6.4 7.5
1802.5	33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 33.0 33.2 33.3 33.4 32.6 33.7	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:= 1821.3	TID:= 33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.4 32.6 33.7	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
1794.2	33.9 33.8 33.9 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7	6.7 6.8 6.3 6.4 6.8 6.7 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.4
1810.9	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.9 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7	6.7 6.8 6.4 6.5 6.8 6.7 6.4 6.4 7.1 7.2 6.5 7.4
1785.8	33.9 33.8 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.6 33.8	6.7 6.8 6.3 6.4 6.8 6.7 6.4 6.4 7.1 7.1 6.4 7.5
1779.7	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.2 32.8 33.2 33.3 33.3 32.4 33.6	6.7 6.8 6.3 6.4 6.8 6.7 6.3 6.4 7.1 7.1 6.3 7.3
1798.3	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.1 32.7 33.2 33.3 33.3 32.6 33.7	6.6 6.7 6.3 6.4 6.7 6.7 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.4
1771.3	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.2 33.4 33.2 32.6 33.7	6.7 6.8 6.2 6.3 6.8 6.7 6.3 6.3 6.9 7.0 6.3 7.4
1802.4	33.8 33.8 33.9 33.2 34.1 34.1 32.9 33.2 33.3 33.2 32.6 33.7	6.6 6.7 6.2 6.3 6.7 6.6 6.3 6.4 7.0 7.1 6.3 7.3
1783.7	33.9 33.7 33.9 33.3 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.3 32.4 33.6	6.6 6.7 6.3 6.4 6.7 6.6 6.2 6.3 7.0 7.0 6.4 7.4
1813.0	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7	6.8 6.8 6.3 6.4 6.9 6.8 6.4 6.4 7.1 7.1 6.4 7.4
1777.5	33.9 33.7 33.8 33.3 34.1 34.2 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.7	6.7 6.8 6.3 6.4 6.7 6.7 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.3
1785.8	33.9 33.8 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.3 32.3 33.7	6.8 6.8 6.3 6.3 6.8 6.8 6.4 6.4 7.0 7.1 6.4 7.4
1806.7	33.9 33.8 33.8 33.2 34.1 34.1 32.9 33.2 33.3 33.2 32.4 33.6	6.7 6.8 6.2 6.4 6.8 6.7 6.4 6.5 7.1 7.1 6.3 7.4
1777.5	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.3 32.4 33.7	6.8 6.8 6.3 6.4 6.9 6.7 6.4 6.4 7.1 7.1 6.4 7.5
1798.4	33.9 33.8 33.9 33.2 34.1 34.1 32.9 33.2 33.2 33.2 32.6 33.6	6.8 6.8 6.4 6.5 6.9 6.8 6.4 6.5 7.2 7.2 6.5 7.5
1771.2	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.2 32.4 33.6	6.9 6.9 6.3 6.4 6.9 6.9 6.4 6.5 7.2 7.2 6.4 7.5
1794.2	33.8 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.3 32.3 33.6	6.9 6.9 6.4 6.5 7.0 6.9 6.5 6.5 7.3 7.2 6.4 7.5
1781.6	33.8 33.7 33.6 33.2 34.1 34.2 32.8 33.1 33.2 33.2 32.4 33.7	6.9 7.0 6.5 6.5 7.0 6.9 6.5 6.5 7.2 7.2 6.5 7.6
1792.1	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.2 32.3 33.7	6.9 7.0 6.4 6.5 7.1 7.0 6.5 6.6 7.2 7.3 6.5 7.6
1813.0	33.9 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6	6.9 7.0 6.4 6.5 7.0 7.0 6.5 6.5 7.3 7.3 6.5 7.6
1790.1	33.9 33.8 33.6 33.2 34.1 34.1 32.9 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6	7.0 7.0 6.5 6.5 7.1 7.0 6.5 6.6 7.2 7.3 6.5 7.6
1810.9	33.9 33.7 33.8 33.3 34.1 34.1 32.8 33.2 33.3 33.2 32.4 33.7	7.0 7.0 6.4 6.5 7.1 7.0 6.5 6.5 7.2 7.3 6.5 7.7
1779.6	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6	6.9 7.0 6.4 6.4 7.0 6.9 6.5 6.5 7.2 7.2 6.5 7.6
1796.2	33.9 33.7 33.8 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.3 33.3 32.4 33.6	7.0 7.0 6.4 6.5 7.0 7.0 6.5 6.5 7.2 7.3 6.5 7.6
1763.0	33.9 33.7 33.6 33.2 34.1 34.1 32.8 33.1 33.2 33.3 32.4 33.6	7.0 7.0 6.4 6.5 7.1 7.0 6.5 6.5 7.3 7.3 6.5 7.7

Probabilité de confiance (fiabilité) de la détermination du coefficient K, fraction d'unité :
 $\alpha := 0,95$

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 puissance électrique consommée, en W :

$$\Delta_Q := \frac{\delta_Q}{100} \cdot \max(QD) = 18,6$$

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

$$\Delta_{Ti} := 0,5$$

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

$$\Delta_{Te} := 0,5$$

Dimensions extérieures de la caisse du wagon :

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

Longueur, valeur moyenne de la longueur et erreur admise, en m :

$$LeD := 15,750 \quad mLe := \text{mean}(LeD) = 15,750 \quad \Delta_{Le} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

Largeur, valeur moyenne de la largeur et erreur admise, en m :

$$BeD := 2,790 \quad mBe := \text{mean}(BeD) = 2,790 \quad \Delta_{Be} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

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

$$HeD := 2,915 \quad mHe := \text{mean}(HeD) = 2,915 \quad \Delta_{He} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

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

$$HHeD := 3,323 \quad mHHe := \text{mean}(HHeD) = 3,323 \quad \Delta_{HHe} := \frac{10^{-3}}{2} = 0,0005$$

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 répétées maintes fois 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), en plus de l'erreur instrumentale de la mesure de la longueur de la caisse du wagon, car elle a été mesuré en deux circuits et en additionnant ensuite les valeurs obtenues.

Erreur instrumentale de la jauge de mesure, en m : $\Delta_{\text{tape}} := \frac{10^{-2}}{2} = 0,005$

Longueur, valeur moyenne de la longueur et erreur instrumentale, en m :

$$LiD := (15,395 \ 15,405 \ 15,400 \ 15,400) \quad mLi := \text{mean}(LiD) = 15,400 \quad \Delta_{Li} := 2 \cdot \Delta_{\text{tape}} = 0,010$$

Largeur, valeur moyenne de la largeur et erreur instrumentale en m :

$$BiD := (2,455 \ 2,450 \ 2,455 \ 2,455) \quad mBi := \text{mean}(BiD) = 2,454 \quad \Delta_{Bi} := \Delta_{\text{tape}} = 0,005$$

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

$$HiD := (2,640 \ 2,630 \ 2,640 \ 2,630) \quad mHi := \text{mean}(HiD) = 2,635 \quad \Delta_Hi := \Delta_tape = 0,005$$

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

$$HHiD := (2,905 \ 2,900) \quad mHHi := \text{mean}(HHiD) = 2,902 \quad \Delta_HHi := \Delta_tape = 0,005$$

Calcul de la puissance thermique :

Longueur du câble électrique entre l'instrument de mesure et l'emplacement de l'instrument de transformation correspondant, en m : $L_line := 60$

Résistivité du conducteur du câble électrique, en ohm.mm²/m : $\rho := 0,0175$

Tension de calcul, en V : $U := 220$

Section du conducteur du câble électrique, en mm² : $s := 2,5$

Calcul des valeurs de la puissance thermique, en W :

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

1 793,1
1 771,6
1 791,2
1 777,4
1 797,1
1 781,2
1 795,1
1 771,6
1 779,4
1 797,1
1 775,4
1 791,2
...

2. Détermination de la surface moyenne de la caisse du wagon et de son intervalle de confiance (erreur aléatoire)

Intervalle de confiance de la mesure de la surface moyenne de la caisse du wagon :

Intervalle de confiance des mesures directes répétées maintes fois avec le même niveau de précision de la longueur intérieure de la caisse, en m :

$$\Delta_mLi_rep := qt \left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{cols}(LiD) - 1) \right] \cdot \sqrt{\frac{\sum (mLi - LiD)^2}{\text{cols}(LiD) \cdot (\text{cols}(LiD) - 1)}} = 0,006$$

Intervalle de confiance des mesures directes uniques de la longueur intérieure de la caisse, en m : $\Delta_mLi_sing := \alpha \cdot \Delta_Li = 0,010$

Intervalle de confiance total de la mesure de la longueur intérieure de la caisse, en m :

$$\Delta_mLi := \sqrt{\Delta_mLi_rep^2 + \Delta_mLi_sing^2} = 0,012$$

De même, en ce qui concerne la largeur, la hauteur de la paroi latérale et la hauteur de l'axe longitudinal central du wagon, en m :

$$\Delta_{mBi_rep} := qt\left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{cols}(\text{BiD}) - 1)\right] \cdot \sqrt{\frac{\sum (mBi - BiD)^2}{\text{cols}(\text{BiD}) \cdot (\text{cols}(\text{BiD}) - 1)}} = 0,004$$

$$\Delta_{mBi_sing} := \alpha \cdot \Delta_{Bi} = 0,005 \quad \Delta_{mBi} := \sqrt{\Delta_{mBi_rep}^2 + \Delta_{mBi_sing}^2} = 0,006$$

$$\Delta_{mHi_rep} := qt\left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{cols}(\text{HiD}) - 1)\right] \cdot \sqrt{\frac{\sum (mHi - HiD)^2}{\text{cols}(\text{HiD}) \cdot (\text{cols}(\text{HiD}) - 1)}} = 0,009$$

$$\Delta_{mHi_sing} := \alpha \cdot \Delta_{Hi} = 0,005 \quad \Delta_{mHi} := \sqrt{\Delta_{mHi_rep}^2 + \Delta_{mHi_sing}^2} = 0,010$$

$$\Delta_{mHHi_rep} := qt\left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{cols}(\text{HHiD}) - 1)\right] \cdot \sqrt{\frac{\sum (mHHi - HHiD)^2}{\text{cols}(\text{HHiD}) \cdot (\text{cols}(\text{HHiD}) - 1)}} = 0,032$$

$$\Delta_{mHHi_sing} := \alpha \cdot \Delta_{HHi} = 0,005 \quad \Delta_{mHHi} := \sqrt{\Delta_{mHHi_rep}^2 + \Delta_{mHHi_sing}^2} = 0,032$$

Les intervalles de confiance pour la longueur extérieure, la largeur, la hauteur de la paroi latérale et la hauteur de l'axe longitudinal central du wagon sont :

$$\Delta_{mLe} := \alpha \cdot \Delta_{Le} = 0,0005 \quad \Delta_{mBe} := \alpha \cdot \Delta_{Be} = 0,0005 \quad \Delta_{mHe} := \alpha \cdot \Delta_{He} = 0,0005 \quad \Delta_{mHHe} := \alpha \cdot \Delta_{HHe} = 0,0005$$

Détermination de la longueur moyenne doublée de la longueur de la courbe formée par le toit du wagon et son intervalle de confiance :

Remarque – On trouvera ci-dessous une formule approximative pour le calcul de la longueur moyenne doublée de la courbe formée par le toit du wagon en partant de l'hypothèse qu'elle est elliptique. L'erreur maximale de cette formule est de ~0,3619 % compte tenu d'une excentricité de l'ellipse de ~0,979811 (rapport axial : ~1/5). Cette erreur liée à la méthode est toujours positive.

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

Fonction de calcul du périmètre de la courbe formée par le toit du wagon :

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

Valeurs moyennes de la longueur doublée de la courbe formée par le toit du wagon à l'extérieur et à l'intérieur, Pe, et à l'intérieur, Pi, en m :

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

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

Intervalle de confiance de la détermination de la longueur doublée de la courbe formée par le toit du wagon à l'extérieur, Δ_mPe , et à l'intérieur, Δ_mPi , en m :

$$\Delta_mPe := \sqrt{\left(\Delta_mBe \frac{d}{dmBe} fP(mBe, mHe, mHHe)\right)^2 + \left(\Delta_mHe \frac{d}{dmHe} fP(mBe, mHe, mHHe)\right)^2 \dots + \frac{0,3619}{100} \cdot mPe = 0,024}$$

$$\Delta_mPi := \sqrt{\left(\Delta_mBi \frac{d}{dmBi} fP(mBi, mHi, mHHi)\right)^2 + \left(\Delta_mHi \frac{d}{dmHi} fP(mBi, mHi, mHHi)\right)^2 \dots + \frac{0,3619}{100} \cdot mPi = 0,078}$$

Détermination de la surface moyenne de la caisse du wagon et son intervalle de confiance (erreur aléatoire) :

Fonction permettant de calculer 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 permettant de calculer la surface moyenne de la caisse du wagon :

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

Valeur de la surface moyenne de la caisse du wagon, m^2 :

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

Intervalle de confiance (erreur aléatoire) de la détermination de la surface moyenne de la caisse du wagon, m^2 :

$$\Delta_mS := \sqrt{\left(\Delta_mLe \frac{d}{dmLe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots = 0,397}$$

$$+ \left(\Delta_mBe \frac{d}{dmBe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mHe \frac{d}{dmHe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mHHe \frac{d}{dmHHe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mLi \frac{d}{dmLi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mBi \frac{d}{dmBi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mHi \frac{d}{dmHi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mHHi \frac{d}{dmHHi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mPe \frac{d}{dmPe} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2 \dots$$

$$+ \left(\Delta_mPi \frac{d}{dmPi} fS(mLe, mBe, mHe, mHHe, mPe, mLi, mBi, mHi, mHHi, mPi)\right)^2$$

3. Détermination de la puissance thermique moyenne et de son intervalle de confiance

Valeur moyenne de la puissance thermique, en W : $mW := \text{mean}(WD) = 1\,755,1$

Intervalle de confiance (erreur aléatoire) de la détermination de la puissance thermique moyenne, en W :

Intervalle de confiance des mesures directes répétées maintes fois avec le même niveau de précision de la puissance thermique, en W :

$$\Delta_{mW_rep} := qt\left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{rows}(WD) - 1)\right] \cdot \sqrt{\frac{\sum (mW - WD)^2}{\text{rows}(WD) \cdot (\text{rows}(WD) - 1)}} = 7,0$$

Intervalle de confiance des mesures directes uniques de la puissance thermique, en W :

$$\Delta_{mW_sing} := \alpha \cdot \Delta_Q = 17,6$$

Intervalle de confiance cumulé de la série de mesures de la puissance thermique, en W :

$$\Delta_{mW} := \sqrt{\Delta_{mW_rep}^2 + \Delta_{mW_sing}^2} = 19,0$$

4. Détermination de la température moyenne à l'intérieur de la caisse du wagon ainsi que de son intervalle de confiance

Valeur moyenne de la température à l'intérieur de la caisse du wagon, en °C :

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

Intervalle de confiance (erreur aléatoire) de la mesure de la température à l'intérieur de la caisse du wagon, K :

Intervalle de confiance des mesures directes répétées maintes fois avec le même niveau de précision de la température à l'intérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta_{mTi_rep} := qt\left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{rows}(TiD) \cdot \text{cols}(TiD) - 1)\right] \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{cols}(TiD)-1} \sum (mTi - TiD)^2}{(\text{rows}(TiD) \cdot \text{cols}(TiD)) \cdot (\text{rows}(TiD) \cdot \text{cols}(TiD) - 1)}} = 0,04$$

Intervalle de confiance des mesures directes uniques de la température à l'intérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta_{mTi_sing} := \alpha \cdot \Delta_{Ti} = 0,5$$

Intervalle de confiance cumulé de la série de mesures de la température à l'intérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta_{mTi} := \sqrt{\Delta_{mTi_rep}^2 + \Delta_{mTi_sing}^2} = 0,5$$

5. Détermination de la température moyenne à l'extérieur de la caisse du wagon ainsi que de son intervalle de confiance

Valeur moyenne de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, en °C :

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

Intervalle de confiance (erreur aléatoire) de la mesure de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, K :

Intervalle de confiance des mesures directes répétées avec le même niveau de précision de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta_{mTe_rep} := qt\left[\frac{\alpha + 1}{2}, (\text{rows}(TeD) \cdot \text{cols}(TeD) - 1)\right] \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{\text{cols}(TeD)-1} \sum_{i=0}^{\text{rows}(TeD)-1} [(mTe - TeD)^2]^{(j)}}{(\text{rows}(TeD) \cdot \text{cols}(TeD)) \cdot (\text{rows}(TeD) \cdot \text{cols}(TeD) - 1)}}} = 0,03$$

Intervalle de confiance des mesures directes uniques de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, K : $\Delta_{mTe_sing} := \alpha \cdot \Delta_{Te} = 0,5$

Intervalle de confiance cumulé de la série de mesures de la température à l'extérieur de la caisse du wagon, K : $\Delta_{mTe} := \sqrt{\Delta_{mTe_rep}^2 + \Delta_{mTe_sing}^2} = 0,5$

6. Détermination de la valeur moyenne du coefficient K et de son intervalle de confiance

Fonction permettant de calculer la valeur du coefficient K : $fK(W, Ti, Te, S) := \frac{W}{S \cdot (Ti - Te)}$

Valeur moyenne du coefficient K, en W/(m²K) : $mK := fK(mW, mTi, mTe, mS) = 0,35$

Intervalle de confiance (erreur aléatoire) de la détermination du coefficient K, W/(m²K) :

$$\Delta_{mK} := \sqrt{\left(\Delta_{mW} \frac{d}{dmW} fK(mW, mTi, mTe, mS)\right)^2 + \left(\Delta_{mTi} \frac{d}{dmTi} fK(mW, mTi, mTe, mS)\right)^2 + \left(\Delta_{mTe} \frac{d}{dmTe} fK(mW, mTi, mTe, mS)\right)^2 + \left(\Delta_{mS} \frac{d}{dmS} fK(mW, mTi, mTe, mS)\right)^2} \dots = 0,01$$

Valeur de l'erreur relative de détermination du coefficient K, en % :

$$\varepsilon_K := \frac{\Delta_{mK}}{mK} \cdot 100 = 2,8$$