



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 6 de l'ordre du jour provisoire

Manuel ATP

Introduction dans le Manuel ATP de méthodes de détermination des surfaces intérieure et extérieure de transfert thermique de la caisse des wagons autres que les wagons-citernes

Communication de la Fédération de Russie

Résumé

Résumé analytique :

Conformément au paragraphe 1.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, la détermination des surfaces extérieure et intérieure de la caisse des engins de transport spéciaux est faite en tenant compte des singularités de structure de la caisse.

Cette disposition ne prévoit cependant pas de méthodes de détermination de ces surfaces qui tiennent compte des singularités connues des caisses des wagons autres que les wagons-citernes (ci-après : les wagons) utilisés pour le transport de denrées périssables, ce qui peut conduire les experts et les stations d'essai ATP à utiliser des méthodes qui ne sont pas acceptables pour d'autres parties à l'ATP.



Mesures à prendre :	Sur la base de la proposition faite par le Royaume-Uni concernant les méthodes de mesure des surfaces de la caisse des fourgons automobiles sans fenêtres dans le compartiment de chargement, qui a été adoptée par le Groupe de travail à sa soixante et onzième session, introduire dans l'ATP des dispositions relatives au calcul de la surface moyenne de la caisse des wagons, en les accompagnant des croquis nécessaires qu'il conviendra d'inclure dans le Manuel ATP.
Documents de référence :	ECE/TRANS/WP.11/2015/2.

Introduction

1. La plupart des engins de transport spéciaux sont dotés d'une caisse dont la forme et les singularités de structure peuvent être regroupés en quelques types courants. Le Royaume-Uni a procédé à une étude des structures connues de caisses de fourgons automobiles sans fenêtres dans le compartiment de chargement, à l'issue de laquelle ont été proposés des croquis et des formules de calcul permettant de déterminer les surfaces intérieure et extérieure de la caisse des engins de transport spéciaux considérés sur la base de méthodes mathématiques connues. Les résultats de ces travaux sont présentés dans le document ECE/TRANS/WP.11/2015/2, adopté par le Groupe de travail à sa soixante et onzième session.

2. Conformément à l'article 3 de l'ATP, les normes et dispositions de l'ATP s'appliquent au transport des denrées périssables par route et par chemin de fer. Les méthodes et les prescriptions applicables aux essais et aux contrôles des caisses et des dispositifs thermiques sont les mêmes pour les engins de transport spéciaux routiers et ferroviaires.

3. Au cours des débats menés par le Groupe de travail à sa soixante-dixième session sur les propositions du Royaume-Uni, les experts de la Fédération de Russie ont émis l'avis qu'il était possible et nécessaire d'utiliser les méthodes proposées par le Royaume-Uni pour calculer la surface moyenne de la caisse des engins de transport spéciaux ferroviaires. Ils ont notamment estimé que l'utilisation de la méthode C'était appropriée dans les cas particulièrement difficiles, lorsque les données sur la structure de la caisse n'étaient pas suffisantes pour que l'on puisse mesurer directement sa surface moyenne, ce qui conduisait à utiliser la méthode des itérations successives.

4. En vue de la soixante et onzième session du Groupe de travail, les experts de la Fédération de Russie ont élaboré une proposition concernant l'application des méthodes proposées par le Royaume-Uni aux wagons, notamment à ceux ayant une toiture arrondie. Cependant, pour des raisons techniques, la proposition de la Fédération de Russie n'a pas été traduite officiellement en anglais et en français dans les délais fixés et le Groupe de travail n'a pas pu l'examiner de manière satisfaisante et voter à son sujet à sa soixante et onzième session.

5. La Fédération de Russie a donc présenté un document officiel contenant des propositions actualisées relatives à l'introduction dans l'ATP et dans le Manuel ATP de dispositions concernant les wagons ferroviaires qui complètent la proposition du Royaume-Uni. Le présent document a été établi sur la base de la version en langue russe de l'ATP en vigueur au moment de son élaboration, telle que modifiée au 30 septembre 2015, du Manuel ATP de 2015, ainsi que de la proposition du Royaume Uni adoptée par le Groupe de travail à sa soixante et onzième session et figurant dans le document ECE/TRANS/WP.11/2015/2.

Propositions

6. Ajouter à la fin de la nouvelle version du paragraphe 1.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, adoptée à la soixante et onzième session du Groupe de travail en 2015, le texte ci-après :

« Les méthodes indiquées ci-dessus sont également utilisables pour le calcul de la surface moyenne de la caisse des wagons ferroviaires autres que les wagons-citernes, y compris ceux ayant une toiture arrondie. On effectue alors les calculs en se conformant aux procédés¹ et formules ci-après :

$$S_i = LI \cdot WI + 2 \cdot (LI + WI) \cdot Wi + LI \cdot \frac{PI}{2} + \pi \cdot \frac{WI}{2} \cdot (HI - Wi)$$

$$S_e = LE \cdot WE + 2 \cdot (LE + WE) \cdot We + LE \cdot \frac{PE}{2} + \pi \cdot \frac{WE}{2} \cdot (HE - We)$$

$$PI = 4 \cdot \left(\left(\frac{WI}{2} \right)^x + (HI - Wi)^x \right)^{\frac{1}{x}}$$

$$PE = 4 \cdot \left(\left(\frac{WE}{2} \right)^x + (HE - We)^x \right)^{\frac{1}{x}}$$

$$x = \frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}}$$

Où :

HI est la hauteur moyenne pondérée de l'intérieur de la caisse sur l'axe central X, m ;

$\frac{PI}{2}$ est la longueur de l'arrondi intérieur de la toiture, m ;

HE est la hauteur moyenne pondérée de l'extérieur de la caisse sur l'axe central X, m ;

$\frac{PE}{2}$ est la longueur de l'arrondi extérieur de la toiture, m ;

$\pi \approx 3,14159$ est le chiffre Pi.

L'erreur relative maximale pour le calcul de PI et de PE avec la méthode indiquée ne dépasse pas 0,3619 % (l'erreur est toujours positive). ».

7. Inclure le croquis suivant dans le Manuel ATP :

« Figure 6 – Cotes d'une caisse à toiture arrondie »



».

Exemples de calcul

8. On trouvera des exemples de calculs réalisés dans Mathcad aux annexes A et B du présent document.

Justification

9. L'application des méthodes de détermination de la surface moyenne de la caisse d'un engin de transport spécial compte tenu de la surface extérieure et de la surface intérieure de ladite caisse est importante si l'on veut que l'ensemble des Parties contractantes, des experts et des centres d'essai comprennent de la même façon les normes et les prescriptions énoncées dans l'ATP. L'utilisation de méthodes communes, compréhensibles et accessibles pour la mesure de la surface moyenne d'une caisse d'engin de transport spécial permettra en effet de renforcer la confiance mutuelle à l'égard des certificats ATP et d'améliorer ainsi le fonctionnement de l'ensemble du système de contrôle et de certification dans le cadre de l'ATP.

10. Dans la pratique, les caisses des engins de transport spéciaux peuvent être de formes très diverses et comporter différents éléments de structure supplémentaires ainsi que des vides cachés, qui doivent être pris en compte dans le cadre des essais ainsi que des contrôles effectués par les experts. L'utilisation de la méthode A, proposée par le Royaume-Uni, est appropriée s'il est possible de prendre pleinement en compte tous ces éléments de structure ainsi que les vides cachés.

11. Dans de nombreux cas il s'avère difficile, pour différentes raisons, de déterminer avec précision la structure de la caisse des engins de transport spéciaux dans le cadre des essais ou des contrôles d'experts, ou alors les méthodes utilisées pour calculer la surface moyenne de la caisse sont trop complexes. Pourtant, il n'est pas difficile de mesurer la surface intérieure des parois, du plancher et de la toiture de toutes les structures connues d'engins de transport spéciaux, y compris lorsqu'ils ont une forme complexe (des exemples qui peuvent être appliqués à toutes les structures de caisse sont analysés dans la proposition du Royaume-Uni figurant dans le document ECE/TRANS/WP.11/2015/2).

Lorsque l'épaisseur moyenne de l'isolant est indiquée par le constructeur dans la documentation technique, il est approprié d'appliquer la méthode B, selon laquelle on détermine les dimensions extérieures de la caisse de l'engin de transport spécial comme les dimensions intérieures, augmentées de l'épaisseur moyenne de l'isolant. Si cette dernière variable n'est pas connue, on emploie la méthode C, qui est la plus universelle.

12. Dans le cadre de l'élaboration des propositions relatives à l'application des méthodes de calcul proposées par le Royaume-Uni aux caisses des wagons ferroviaires, les experts de la Fédération de Russie ont dû tenir compte des singularités de structure de l'enveloppe du wagon et, en premier lieu, de sa toiture.

Un examen des données contenues dans le manuel intitulé « Wagons conçus pour des voies ferrées ayant un écartement de 1 520 mm »¹ a montré que la structure de caisse de wagon la plus courante se compose de parois verticales de hauteur égale, d'un plancher rectangulaire et d'une toiture arrondie. Les parois et les planchers ayant une telle structure sont relativement faciles à mesurer. Lorsqu'ils sont de forme plus complexe, il est possible d'utiliser des valeurs moyennes pondérées, calculées selon les méthodes proposées par le Royaume-Uni.

Ces méthodes ne peuvent toutefois pas être utilisées si la toiture de l'engin de transport spécial est arrondie. Il a donc fallu élaborer des méthodes différentes pour mesurer la surface de ce type de toiture.

13. Si le constructeur fournit un descriptif précis permettant de déterminer la longueur de l'arrondi de la toiture, il est effectivement possible de mesurer la surface de la toiture selon la méthode A (toutes les données sont connues).

Cependant, même si ces informations figurent dans la documentation technique, l'utilisation de méthodes mathématiques complexes reste souvent nécessaire. Pour déterminer le coefficient K avec une marge d'erreur ne dépassant pas les valeurs indiquées au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP, il est possible d'utiliser une méthode plus simple, fondée sur la représentation de l'arrondi de la toiture comme correspondant à la moitié du périmètre de l'ellipse. Le périmètre de l'ellipse peut être déterminé à partir de la valeur des deux axes de celle-ci, qui correspondent à la largeur de la caisse et à la hauteur de l'arrondi de la toiture, avec une petite marge d'erreur n'excédant pas 0,3619 % compte tenu d'une excentricité de l'ellipse de $\sim 0,979811$ (rapport axial : $\sim 1/5$, ce qui correspond globalement à la plupart des structures de wagon connues). C'est précisément cette méthode de mesure qui est proposée par les experts de la Fédération de Russie.

Il est possible de calculer l'erreur globale de mesure de la surface moyenne de la caisse en utilisant les méthodes présentées dans le Manuel ATP (voir l'observation relative au paragraphe 2.3.2 de l'appendice 2 de l'annexe 1 de l'ATP).

14. En conclusion, il est nécessaire de vérifier l'applicabilité de la méthode de calcul C aux structures connues de caisses de wagons ferroviaires autres que les wagons-citernes. Compte tenu des objectifs principaux de l'ATP, qui sont de garantir les conditions de conservation de la qualité des denrées périssables au cours de leur transport, il est évident que la valeur du coefficient K, calculée d'après la méthode C, ne doit pas être inférieure à sa valeur réelle. La surface moyenne calculée de la caisse de l'engin de transport spécial doit donc être minimale, ce qui correspond également à une épaisseur moyenne calculée de l'isolant minimale. L'épaisseur de l'isolant dépend en général de la conductivité thermique des matériaux dont il est composé (habituellement du matériau utilisé comme agent de

¹ Publication d'information de la Fédération de Russie, élaborée par le bureau d'études RJD.

remplissage principal des structures d'isolation du compartiment de chargement des engins de transport spéciaux).

À l'heure actuelle, c'est souvent de la mousse de polyuréthane qui est utilisée pour l'isolation des caisses des engins de transport spéciaux, y compris celles des wagons ferroviaires de nouvelle génération, car ce matériau a un coefficient de transmission thermique bien plus faible que celui des autres matériaux isolants connus utilisés pour ces mêmes caisses. Les mousses de polyuréthane fabriquées industriellement peuvent avoir un coefficient de transmission thermique allant jusqu'à 0,019 W/(m·K). Dans la pratique cependant, c'est-à-dire compte tenu de la température, de l'humidité et des conditions de fabrication et d'application de la mousse sur les surfaces d'isolation, ce coefficient est rarement inférieur à une valeur comprise entre 0,023 et 0,025 W/(m·K). En effet, durant la période d'exploitation du wagon, à mesure que la mousse vieillit et subit les effets de l'humidité, le coefficient de transmission thermique ne fait qu'augmenter. Par conséquent, le coefficient calculé de 0,025 W/(m·K) proposé par le Royaume-Uni dans le document ECE/TRANS/WP.11/2015/2 apparaît acceptable et raisonnable tant pour les engins de transport spéciaux routiers que pour les wagons ferroviaires.

15. Sur la base de la formule bien connue pour le calcul théorique du coefficient de transmission thermique (sans tenir compte de la convection ni du rayonnement), on peut obtenir l'épaisseur moyenne calculée de l'isolant, d , au moyen de l'équation suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{W}{\Delta T \cdot S}$$

Où :

α_e , α_i sont les valeurs de transfert thermique calculées respectivement pour les surfaces extérieure et intérieure de la caisse de l'engin de transport spécial (ces valeurs ont une incidence négligeable sur le coefficient K et peuvent donc être ignorées dans les calculs) ;

$\lambda = 0,025$ W/(m·K) est la valeur calculée pour le coefficient de transmission thermique ;

S doit être calculé comme suit en l'occurrence :

$$S = \sqrt{S_i \cdot S_e} = \sqrt{S_i \cdot f(S_i, d)}$$

On peut théoriquement résoudre une semblable équation en ce qui concerne la grandeur d en utilisant les méthodes numériques (voir la méthode D à l'annexe A) ou la méthode des itérations (méthode C). Comme on peut le constater, les deux méthodes donnent le même résultat, mais la méthode des itérations est beaucoup plus accessible (elle ne nécessite pas l'utilisation d'algorithmes spéciaux ou d'outils logiciels). En outre, le nombre requis d'itérations n'est pas très élevé et dépend généralement du niveau de précision spécifié de la grandeur recherchée (dans les exemples présentés dans les annexes A et B, cette précision est de 0,001 m).

Coûts

16. Il n'y a pas de coûts supplémentaires à prévoir. L'application des méthodes de calcul de la surface moyenne de la caisse des wagons autres que les wagons-citernes ne nécessite pas d'instruments supplémentaires, de méthodes mathématiques compliquées ou de procédures coûteuses.

Faisabilité

17. Les modifications proposées favoriseront la réalisation des principaux objectifs et buts de l'ATP sans coûts supplémentaires ni période de transition. En outre, elles contribueront à renforcer la confiance mutuelle des Parties contractantes.

Applicabilité

18. Il n'est prévu aucun problème en ce qui concerne les essais et les contrôles d'experts.

Annexe A

Détermination de la surface moyenne de la caisse d'un wagon ferroviaire (sur la base du nouveau wagon isotherme fabriqué dans les ateliers de Dessau (Allemagne))

1. Données de référence

Dimensions intérieures de la caisse du wagon, m :

longueur : $\overline{LI} := 20.596$

largeur : $\overline{WI} := 2.702$

hauteur des parois latérales : $\overline{Wi} := 2.550$

hauteur sur l'axe longitudinal central : $\overline{HI} := 3.195$

Épaisseur moyenne déclarée de l'isolant, m, dans les éléments de la caisse suivants :

parois d'extrémités : $\overline{d_LI} := 2 \cdot 0.200$

parois et portes latérales : $\overline{d_WI} := 2 \cdot 0.194$

plancher : $\overline{d_Wi_dn} := 0.185$

toiture : $\overline{d_Wi_up} := 0.200$

Remarque : Les valeurs relatives à l'épaisseur moyenne de l'isolation sont indiquées dans la documentation d'exploitation du wagon isotherme de type TH 4-201-90.

Coefficient calculé de transmission thermique des parois intérieures de la caisse, $W/(m^2 \cdot K)$: $\overline{\alpha_i} := \infty$

Coefficient calculé de transmission thermique des parois extérieures de la caisse, $W/(m^2 \cdot K)$: $\overline{\alpha_e} := \infty$

Remarque : ces paramètres ont une incidence négligeable sur les résultats des calculs ; par souci de simplification, ils ont été ignorés par l'attribution d'une valeur infinie.

Paramètres mesurés en conditions stables :

Puissance thermique moyenne, W : $\overline{W} := 1080$

Écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur de la caisse du wagon, K : $\overline{\Delta T} := 25$

Coefficient calculé de transmission thermique du matériau isolant de la caisse, $W/(m \cdot K)$: $\overline{\lambda} := 0.025$

2. Calcul selon la méthode A

Surface moyenne de la caisse du wagon, m^2 : $\overline{S_A} := 262.5$

Remarque : Le calcul de la surface moyenne de la caisse du wagon n'est pas transcrit en raison de sa longueur.

Fonction de calcul du coefficient K : $fK(W, \Delta T, S) := \frac{W}{S \cdot \Delta T}$

Coefficient K, $W/(m^2 \cdot K)$: $coefK_A := fK(W, \Delta T, S_A) = 0.165$

3. Calcul selon la méthode B

Détermination des dimensions extérieures théoriques de la caisse du wagon, m :

longueur : $LE := LI + d_LI = 20.996$

largeur : $WE := WI + d_WI = 3.090$

hauteur des parois latérales : $We := Wi + d_Wi_dn = 2.735$

hauteur sur l'axe longitudinal central : $HE := HI + d_Wi_dn + d_Wi_up = 3.580$

Variable empirique pour le calcul de la longueur de l'arrondi de la toiture :

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

Fonction de calcul de la longueur de l'arrondi de la toiture :

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

Fonction de calcul de la surface extérieure ou intérieure de la caisse du wagon :

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

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

$$fS(LE, WE, We, HE, LI, WI, Wi, HI) := \sqrt{fS(LE, WE, We, HE) \cdot fS(LI, WI, Wi, HI)}$$

Surface moyenne de la caisse du wagon, m^2 : $S_B := fS(LE, WE, We, HE, LI, WI, Wi, HI) = 261.982$

Coefficient K, $W/(m^2 \cdot K)$: $coefK_B := fK(W, \Delta T, S_B) = 0.165$

4. Calcul selon la méthode C

```

proc(LI, WI, Wi, HI, W, ΔT, λ, αe, αi) :=
  prec ← 0.001
  n ← 0
  dn ← 0
  LEn ← LI + 2·dn
  WEn ← WI + 2·dn
  Wen ← Wi + dn
  HEn ← HI + 2·dn
  Sn ← fS(LEn, WEn, Wen, HEn, LI, WI, Wi, HI)
  coefKCn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot S_n}$ 
  Δd ← ∞
  while Δd > prec
    n ← n + 1
    dn ←  $\left( \frac{\Delta T \cdot S_{n-1}}{W} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_i} \right) \cdot \lambda$ 
    LEn ← LI + 2·dn
    WEn ← WI + 2·dn
    Wen ← Wi + dn
    HEn ← HI + 2·dn
    Sn ← fS(LEn, WEn, Wen, HEn, LI, WI, Wi, HI)
    coefKCn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot S_n}$ 
    Δd ← |dn - dn-1|
  return (d LE WE We HE S coefKC)

```

Liste des variables supplémentaires :

prec=10⁻³m est la précision dans le choix de l'épaisseur moyenne de l'isolant ;

n est le numéro d'itération, à compter de zéro (indexation dans Mathcad) ;

d_n est l'épaisseur moyenne de l'isolant, obtenue par l'itération n, m ;

LE_n est la longueur extérieure calculée de la caisse du wagon, obtenue par l'itération n, m ;

WE_n - idem pour la largeur, m ;

We_n - idem pour la hauteur latérale, m ;

HE_n - idem pour la hauteur sur l'axe longitudinal central, m ;

S_n est la surface extérieure moyenne calculée de la caisse du wagon, obtenue par l'itération n, m ;

coefK_C_n est le coefficient K calculé, obtenu par l'itération n selon la méthode C, W/(m²·K) ;

Δd est le module de changement absolu de l'épaisseur moyenne calculée de l'isolant, m (Δd>prec).

Résultat du choix des paramètres (colonnes d | LE | WE | We | HE | S | coefK_C) dans les itérations (lignes) :

$$\text{pro}(LI, WI, Wi, HI, W, \Delta T, \lambda, \alpha_e, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0.000 \\ 0.141 \\ 0.149 \\ 0.149 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 20.596 \\ 20.878 \\ 20.894 \\ 20.894 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.702 \\ 2.984 \\ 3.000 \\ 3.000 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.550 \\ 2.691 \\ 2.699 \\ 2.699 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 3.195 \\ 3.477 \\ 3.493 \\ 3.493 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 243.940 \\ 257.146 \\ 257.854 \\ 257.892 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0.177 \\ 0.168 \\ 0.168 \\ 0.168 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

5. Détermination de l'épaisseur moyenne de l'isolant selon la méthode D

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{W}{\Delta T \cdot fS(LI + 2 \cdot d, WI + 2 \cdot d, Wi + d, HI + 2 \cdot d, LI, WI, Wi, HI)} \text{ solve} \rightarrow 0.1492441624219862096$$

Annexe B

Détermination de la surface moyenne de la caisse du wagon ferroviaire (sur la base d'essais réalisés en avril 2015 sur le wagon n° 80007990)

1. Données de référence

Dimensions intérieures de la caisse du wagon, m :

longueur : $LI := \text{mean}((15.340 \ 15.340 \ 15.345 \ 15.340)) = 15.341$

largeur : $WI := \text{mean}((2.470 \ 2.470 \ 2.465 \ 2.465)) = 2.468$

hauteur des parois latérales : $Wi := \text{mean}((2.635 \ 2.635 \ 2.630 \ 2.620)) = 2.630$

hauteur sur l'axe longitudinal central : $HI := \text{mean}((2.900 \ 2.900)) = 2.900$

Remarque : Les dimensions intérieures de la caisse sont déterminées au moyen de mesures répétées dans des conditions inchangées.

Épaisseur moyenne déclarée de l'isolant, m, dans les éléments de la caisse suivants :

parois d'extrémités : $d_{LI} := 2 \cdot 0.150 = 0.300$

parois latérales : $d_{WI_wl} := 2 \cdot 0.150 = 0.300$

portes latérales : $d_{WI_dr} := 2 \cdot 0.100 = 0.200$

plancher : $d_{Wi_dn} := 0.100$

toiture : $d_{Wi_up} := 0.150$

Ouverture de chargement, m :

largeur : $b := 2.150$

hauteur : $h := 2.090$

Remarque : L'épaisseur moyenne de l'isolant ainsi que l'ouverture de chargement sont indiquées dans la documentation technique TU 3182601-427-01055865-08.

Épaisseur moyenne calculée de l'isolant, m, dans les parois et les portes latérales :

$$d_{WI} := \frac{d_{WI_dr}(b \cdot h) + d_{WI_wl}(LI \cdot WI - b \cdot h)}{LI \cdot WI} = 0.289$$

Coefficient calculé de transmission thermique des parois intérieures de la caisse, $W/(m^2 \cdot K)$: $\alpha_i := \infty$

Coefficient calculé de transmission thermique des parois extérieures de la caisse, $W/(m^2 \cdot K)$: $\alpha_e := \infty$

Remarque : ces paramètres ont une incidence négligeable sur les résultats des calculs ; par souci de simplification, ils ont été ignorés par l'attribution d'une valeur infinie.

Paramètres mesurés en conditions stables :

puissance thermique moyenne, W : $\overline{W} := 1627$

écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur de la caisse du wagon, K :

$$\Delta T := 25.4$$

Coefficient calculé de transmission thermique du matériau isolant de la caisse, W/(m·K) :

$$\lambda := 0.025$$

Fonction de calcul du coefficient K :

$$fK(W, \Delta T, S) := \frac{W}{S \cdot \Delta T}$$

2. Calcul selon la méthode A

Remarque : Le calcul ne peut pas être effectué en raison du manque de données sur la structure interne de l'isolant et sur les singularités de structure de la caisse.

3. Calcul selon la méthode B

Détermination des dimensions extérieures théoriques de la caisse du wagon, m :

longueur : $LE := LI + d_{LI} = 15.641$

largeur : $WE := WI + d_{WI} = 2.756$

hauteur des parois latérales : $We := Wi + d_{Wi_dn} = 2.730$

hauteur sur l'axe longitudinal central : $HE := HI + d_{Wi_dn} + d_{Wi_up} = 3.150$

Variable empirique pour le calcul de la longueur de l'arrondi de la toiture :

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

Fonction de calcul de la longueur de l'arrondi de la toiture :

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

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

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

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

$$fS(LE, WE, We, HE, LI, WI, Wi, HI) := \sqrt{fS(LE, WE, We, HE) \cdot fS(LI, WI, Wi, HI)}$$

Surface moyenne de la caisse du wagon, m² :

$$S_B := fS(LE, WE, We, HE, LI, WI, Wi, HI) = 182.570$$

Coefficient K, W/(m²·K) : $coefK_B := fK(W, \Delta T, S_B) = 0.351$

4. Calcul selon la méthode C

```

proc(LI, WI, Wi, HI, W, ΔT, λ, αe, αi) :=
  prec ← 0.001
  n ← 0
  dn ← 0
  LEn ← LI + 2·dn
  WEn ← WI + 2·dn
  Wen ← Wi + dn
  HEn ← HI + 2·dn
  Sn ← fS(LEn, WEn, Wen, HEn, LI, WI, Wi, HI)
  coefKCn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot S_n}$ 
  Δd ← ∞
  while Δd > prec
    n ← n + 1
    dn ←  $\left( \frac{\Delta T \cdot S_{n-1}}{W} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_i} \right) \cdot \lambda$ 
    LEn ← LI + 2·dn
    WEn ← WI + 2·dn
    Wen ← Wi + dn
    HEn ← HI + 2·dn
    Sn ← fS(LEn, WEn, Wen, HEn, LI, WI, Wi, HI)
    coefKCn ←  $\frac{W}{\Delta T \cdot S_n}$ 
    Δd ← |dn - dn-1|
  return (d LE WE We HE S coefKC)

```

Liste des variables supplémentaires :

$prec = 10^{-3}m$ est la précision dans le choix de l'épaisseur moyenne de l'isolant ;

n est le numéro d'itération, à compter de zéro (indexation dans Mathcad) ;

d_n est l'épaisseur moyenne de l'isolant, obtenue par l'itération n , m ;

LE_n est la longueur extérieure calculée de la caisse du wagon, obtenue par l'itération n , m ;

WE_n - idem pour la largeur, m ;

We_n - idem pour la hauteur des parois latérales, m ;

HE_n - idem pour la hauteur sur l'axe longitudinal central, m ;

S_n est la surface moyenne calculée de la caisse du wagon, obtenue par l'itération n , m ;

$coefK_{C_n}$ est le coefficient K calculé, obtenu par l'itération n selon la méthode C, $W/(m^2 \cdot K)$;

Δd est le module de changement absolu de l'épaisseur moyenne calculée de l'isolant, m ($\Delta d > prec$).

Résultat du choix des paramètres (colonnes d | LE | WE | We | HE | S | coefK_C) dans les itérations (lignes) :

$$\text{pro}(\alpha, \text{LI}, \text{WI}, \text{Wi}, \text{HI}, \text{W}, \Delta T, \lambda, \alpha_e, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0.000 \\ 0.067 \\ 0.069 \\ 0.069 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 15.341 \\ 15.476 \\ 15.480 \\ 15.480 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.468 \\ 2.602 \\ 2.606 \\ 2.606 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.630 \\ 2.697 \\ 2.699 \\ 2.699 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2.900 \\ 3.035 \\ 3.039 \\ 3.039 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 172.785 \\ 177.672 \\ 177.810 \\ 177.814 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0.371 \\ 0.361 \\ 0.360 \\ 0.360 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$
