



Bases du calcul des constructions – Actions climatiques de la température

Bases for design of structures – Temperature climatic actions

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux.

La tâche principale des comités techniques de l'ISO est d'élaborer les Normes internationales. Exceptionnellement, un comité technique peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1: lorsque, en dépit de maints efforts au sein d'un comité technique, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2: lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique et requiert une plus grande expérience;
- type 3: lorsqu'un comité technique a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales (ceci pouvant comprendre des informations sur l'état de la technique, par exemple).

La publication des rapports techniques dépend directement de l'acceptation du Conseil de l'ISO. Les rapports techniques des types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques du type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données fournies ne soient plus jugées valables ou utiles.

L'ISO/TR 9492 a été élaboré par le comité technique ISO/TC 98, *Bases du calcul des constructions*.

Les raisons justifiant la décision de publier le présent document sous forme de rapport technique du type 2 sont exposées dans l'introduction.

Sommaire

	Page
0 Introduction	2
1 Objet et domaine d'application du document	2
2 Principes généraux	3
3 Définitions	5
4 Symboles principaux	5

CDU 624.042.5 : 725/728

Réf. n° ISO/TR 9492 : 1987 (F)

Descripteurs: architecture, règle de construction, projet de construction, température, action des intempéries, bâtiment.

© Organisation internationale de normalisation, 1987 ●

Imprimé en Suisse

Prix basé sur 28 pages

5	Température de l'air extérieur	6
6	Rayonnement solaire	10
7	Température de l'air intérieur dans les bâtiments	16
8	Température moyenne et gradient de température dans la section transversale des structures	16
	Bibliographie	27

0 Introduction

0.1 Des travaux sur ce sujet ont été entrepris en 1977, et le présent document est basé en grande partie sur des travaux de recherches effectuées en URSS. Les recommandations et formules proposées sont considérées comme ayant une valeur technique sûre, mais elles ne sont pas encore reconnues au niveau international. Pour cette raison, il a été décidé de publier ce document sous la forme d'un Rapport technique ISO du type 2 et l'on considère que, sur la base de l'expérience acquise sur quelques années avec ce document, il sera possible de le transformer en Norme internationale.

Il faut noter qu'il a été proposé d'élargir le domaine d'application de ce document afin d'y inclure des ponts ou, pour être plus précis, des ouvrages de type « pont ». Toutefois, le présent Rapport technique ne contient pas encore tous les détails spécifiques concernant les actions de la température sur les ouvrages de type « pont » dont il faudrait tenir compte.

0.2 Dans la construction moderne, on prend actuellement de plus en plus conscience qu'il est nécessaire de tenir convenablement compte des actions climatiques de la température dans les projets de bâtiments et d'ouvrages. Ce fait est lié à un certain nombre de facteurs: augmentation des dimensions des ouvrages, utilisation de structures présentant un nombre réduit de joints, expansion de la construction d'ouvrages de type linéaire (canalisations et tuyauteries, chevalets, ponts et viaducs), emploi de matériaux ayant un coefficient élevé de dilatation linéique (par exemple alliages d'aluminium) et développement de régions soumises à des conditions climatiques sévères.

Lorsque les actions climatiques de la température dans les bâtiments et ouvrages sont sous-estimées, il risque de se produire une défaillance des joints, les composants se déforment, la liberté de dilatation peut être insuffisante et des fissurations peuvent apparaître.

Les projeteurs des différents pays ne sont pas d'accord sur la nécessité de prendre en compte les actions climatiques de la température, ni sur les méthodes permettant de les déterminer. La mise au point d'une méthode unifiée de détermination des actions climatiques de la température doit contribuer à une prise en compte plus correcte et unifiée des effets de la température sur les constructions.

0.3 Les premières études portant sur les effets climatiques de la température sur les constructions remontent au début de ce siècle. Les années 20 ont vu se développer un certain nombre d'études expérimentales et théoriques de grande importance concernant la détermination des variations annuelles de température dans les ouvrages en béton, en béton armé et en maçonnerie (essentiellement les ponts, par le Prof. H. Krüger en Suède [1], l'Ing. W. Lüdtin en Allemagne [2] et le Prof. P.V. Shchusev en URSS [3]). Chacun de ces auteurs a proposé une méthode permettant de déterminer les variations annuelles de température des ouvrages, du moins en ce qui concerne les conditions climatiques de son pays. La méthode proposée par P.V. Shchusev a été adoptée en tant que base pour la préparation de la section correspondante du *Code de conception des ponts et tuyauteries en URSS* [4].

D'importants travaux portant sur les effets de la température ont été effectués en URSS par V.S. Lukyanov et I.I. Denisov (*Prévention de la formation de fissures de dilatation dans les piles des ponts en béton*) [5], S.V. Alexandrovsky (pour les ouvrages hydrauliques) [6], L.I. Goretsky (pour les pistes d'aérodromes) [7] et A.A. Emelyanov (pour les bâtiments en maçonnerie et panneaux de grandes dimensions) [8] à [10]. Il faut aussi mentionner les travaux effectués par V. Eichler [11], H. Falkner [12] et [13], M. Emerson [14] à [17], M.R. Jones [18] et [19] et d'autres.

C'est en URSS [20] et [21] qu'ont été faites les premières propositions concernant le choix des températures initiales pour les projets d'ouvrages, en se fondant sur l'analyse statistique des données. Ces propositions ont fait l'objet de développements supplémentaires et ont été complétées lors de la préparation de la Section « Actions climatiques de la température » dans le Code II-6-74 [22] à [26].

1 Objet et domaine d'application

Le présent Rapport technique est destiné à servir de guide pour les rédacteurs des codes de construction; il peut s'appliquer à la détermination des valeurs caractéristiques défavorables des actions climatiques de la température qui sont prises en compte dans l'analyse statique des ouvrages, quand les variations de la température peuvent être considérées comme linéaires dans la section transversale.

Le présent Rapport technique ne s'applique pas aux structures massives (barrages, murs de soutènement, tunnels, piles de ponts, etc.). Quand on étudie ces ouvrages, il peut être nécessaire de prendre en compte une distribution non linéaire de la température à travers la masse principale des éléments de construction massifs. Ce point pourrait aussi être important dans les ouvrages en plusieurs couches et composites (par exemple, acier-béton), de même que dans les ouvrages dans lesquels aucune fissuration n'est admissible. Dans des cas de ce genre, c'est par des calculs thermophysiques ou à partir de données expérimentales qu'il faut déterminer la distribution non linéaire de la température.

Compte tenu de la grande variété de types de bâtiments et d'ouvrages et de leurs fonctions, du régime de leur température intérieure, de leur conception architecturale et structurale, il est utile de classer les bâtiments et ouvrages simplement en fonction de leur régime de température intérieure: ouvrages ouverts et bâtiments non chauffés; bâtiments périodiquement chauffés dans la saison froide; bâtiments à air conditionné; bâtiments possédant des sources technologiques permanentes de chaleur ou de réfrigération. Les ouvrages sont classés selon leurs fonctions et selon l'importance de leur protection vis-à-vis du rayonnement solaire en structures d'enceinte externes et structures situées à l'intérieur d'un bâtiment. On suppose que les ouvrages ne sont pas massifs et sont réalisés en matériaux de construction courants: métaux, béton armé, maçonnerie (y compris les briques) ou combinaison de ces matériaux.

2 Principes généraux

Les principaux facteurs climatiques qui influencent la température des ouvrages sont la température de l'air extérieur et le rayonnement solaire. L'effet du rayonnement thermique n'est pas pris en compte dans le présent Rapport technique. Si nécessaire, cet effet peut être remplacé en réduisant d'une manière équivalente la température extérieure de 2 à 5 K.

Les facteurs climatiques sont des processus aléatoires, qui sont caractérisés par seulement deux variations périodiques régulières: les variations annuelles et les variations journalières. Du fait des variations de la température de l'air et de l'intensité du rayonnement solaire, le champ de températures des ouvrages varie d'une manière permanente avec le temps, donc d'une manière aléatoire et non stationnaire. La distribution des températures dans la section transversale d'un élément structural est à tout moment non linéaire.

En analyse statique, le champ de températures est normalement pris en compte pour la période de temps la plus défavorable. Dans ce cas, le champ de températures non stationnaire est souvent remplacé par un champ stationnaire équivalent. On suppose que la température dans une section transversale quelconque est distribuée selon une loi linéaire. Ci-après, on ne prend en compte que la variation linéaire dans une seule direction, car une variation linéaire dans une direction orthogonale peut être ajoutée par superposition.

Le diagramme linéaire des températures peut être divisé en deux parties (voir figure 1). La première est uniforme, avec une valeur égale à la température le long de l'axe de la barre, ce qui provoque l'allongement ou le raccourcissement de la barre. Le deuxième diagramme présente une variation linéaire en fonction de la distance à l'axe, ce qui est à l'origine de la flexion de l'axe sans modification de sa longueur.

Dans les systèmes isostatiques, les variations de la température provoquent des déplacements, mais ne conduisent à aucun moment de flexion ni à des forces transversales ou longitudinales. Dans les systèmes hyperstatiques, les variations de température donnent naissance à des forces interne. Lors de la détermination des forces et déplacements provoqués par la température dans des structures hyperstatiques, la température moyenne dans la section transversale d'un élément et le gradient de température dans l'épaisseur de cet élément peuvent être pris en compte séparément.

Les structures dont l'état sous contrainte ou après déformation provoquée par des actions climatiques est affecté essentiellement par des déformations axiales dues à la température (par exemple, les cadres dans les bâtiments) doivent être calculées pour la valeur la plus défavorable de la différence ΔT (dans le temps) entre la température initiale T_0 et la température moyenne dans la section transversale pendant la saison chaude (T_{hk}) et pendant la saison froide (T_{lk}):

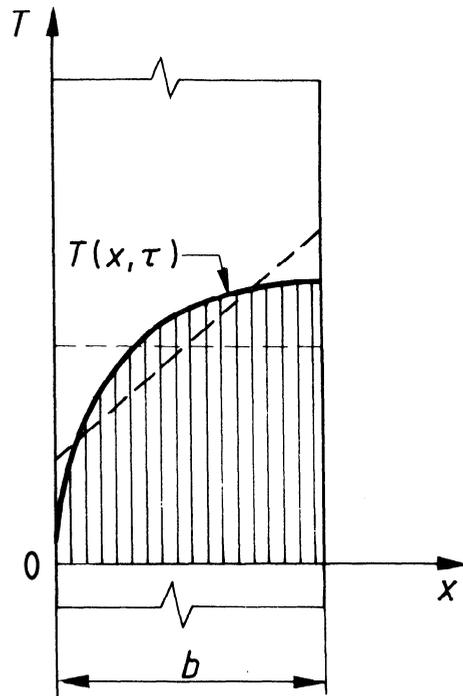
$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{hk} &= T_{hk} - T_0 \\ \Delta T_{lk} &= T_{lk} - T_0 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

Ce que l'on appelle la « température d'achèvement », qui correspond au stade d'achèvement du système structural (ou d'une partie de ce système), est supposé être la température initiale. Quelquefois, la température d'achèvement est aussi appelée température à « contrainte zéro », du fait que les contraintes dans la structure dues à la température sont égales à zéro, ou proches de zéro après le stade d'achèvement. La température d'achèvement est supposée être conforme aux conditions de montage prescrites (dates d'achèvement selon calendrier, séquence des opérations, etc.).

Cependant, en général, on ne connaît pas ces conditions au stade de la conception. Dans ce cas, il est recommandé de supposer deux valeurs pour la température initiale: T_{0l} pour la saison froide et T_{0h} pour la saison chaude.

Les formules suivantes définissent les valeurs caractéristiques ΔT :

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{hk} &= T_{hk} - T_{0l} \\ \Delta T_{lk} &= T_{lk} - T_{0h} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

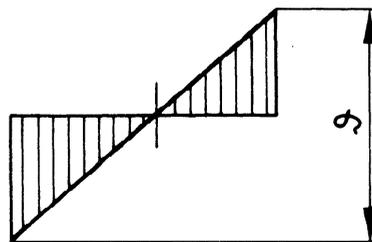


a) cas courant
iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

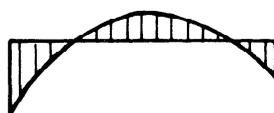
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sis/d4c0cb24-c590-4c71-a17c-09055e5f3bd2/iso-tr-9492-1987>



b) partie à distribution uniforme



c) partie à distribution linéaire non uniforme



d) partie à distribution non linéaire

Figure 1 — Distribution de la température dans la section transversale d'une plaque

Les structures pour lesquelles il est important d'estimer les contraintes et déformations provoquées par une distribution non uniforme de la température dans la section transversale d'un élément (par exemple la structure d'enceinte du bâtiment) devraient être conçues pour la différence de température (gradient de température) la plus défavorable entre la surface externe et la surface interne d'un élément, ϑ_{hk} pour la saison chaude et ϑ_{lk} pour la saison froide. Dans ce cas, la distribution de la température dans la section transversale peut être considérée comme linéaire.

Les valeurs caractéristiques les plus défavorables de la température moyenne dans la section transversale, du gradient de température et de la distribution non linéaire de la température pour la saison chaude et la saison froide, doivent être déterminées par des méthodes thermoplastiques ou à partir de résultats expérimentaux.

On peut évaluer par les formules approchées du tableau 3 les valeurs caractéristiques de la température moyenne dans la section transversale, T_{hk} et T_{lk} , et le gradient de température dans la section transversale d'un élément, ϑ_{hk} et ϑ_{lk} , pour les structures monocouche. Les bases de ces formules et la détermination des valeurs caractéristiques des paramètres sont expliquées au chapitre 5.

3 Définitions

Dans le cadre de la présente Norme internationale, les définitions suivantes sont applicables.

3.1 intensité maximale du rayonnement solaire total, S_x : Quantité de chaleur qui tombe sur la surface d'un corps par unité de temps, sous l'effet du rayonnement solaire direct et diffusé, au cours du mois le plus chaud, sous un ciel clair, en watts par mètre carré.

3.2 facteur d'absorption du rayonnement solaire, k_g : Rapport entre le rayonnement solaire absorbé par la surface d'un corps et le rayonnement solaire total.

3.3 coefficient d'échange de chaleur, α_e : Quantité de chaleur générée (ou reçue) par l'unité de surface quand la différence de température entre la surface du corps et l'air extérieur est de 1 K, en watts par mètre carré kelvin.

3.4 coefficient de conduction thermique; conduction thermique, λ : Quantité de chaleur qui traverse par unité de temps une unité d'aire quand le gradient de température sur une longueur unitaire d'une normale à cette surface est de 1 K, en watts par mètre kelvin.

3.5 capacité calorifique spécifique, c : Quantité de chaleur absorbée par l'unité de masse d'un corps quand il est chauffé de 1 K, en joules par kilogramme kelvin.

3.6 résistance thermique, R : Inverse du facteur de pénétration thermique, qui est la quantité de chaleur traversant par unité de temps une unité d'aire quand la différence de température entre les faces opposées est de 1 K, en mètres carrés kelvin par watt.

4 Symboles principaux

Les symboles principaux utilisés dans le présent Rapport technique sont les suivants :

a_{ehk}, a_{elk}	valeurs caractéristiques de l'écart journalier de la température de l'air extérieur pendant la saison chaude et pendant la saison froide, respectivement;
T_{ehk}, T_{elk}	valeurs caractéristiques de la température journalière moyenne de l'air extérieur pendant la saison chaude et pendant la saison froide, respectivement;
S_{xk}	valeurs caractéristiques de l'intensité maximale du rayonnement solaire total (direct et diffusé);
T_{sk}, a_{sk}	valeurs caractéristiques de la température journalière équivalente moyenne et de l'écart journalier équivalent de température provoqué par le rayonnement solaire;
T_{ihk}, T_{ilk}	valeurs caractéristiques de la température de l'air intérieur dans les immeubles chauffés pendant la saison chaude et pendant la saison froide, respectivement;
T_{hk}, T_{lk}	valeurs caractéristiques de la température moyenne dans la section transversale d'un élément de construction pendant la saison chaude et pendant la saison froide, respectivement;
$\vartheta_{hk}, \vartheta_{lk}$	valeurs caractéristiques du gradient de température dans la section transversale d'un élément de construction pendant la saison chaude et pendant la saison froide, respectivement;

T_0	température initiale;
ΔT	différence entre la température initiale et la température moyenne dans la section transversale d'un élément de construction;
b	épaisseur de l'élément, en mètres;
λ	coefficient de conduction thermique du matériau, en watts par mètre kelvin;
c	capacité calorifique spécifique du matériau, en joules par kilogramme kelvin;
ρ	masse volumique du matériau, en kilogrammes par mètre cube;
$R = \frac{b}{\lambda}$	résistance thermique, en mètres carrés kelvin par watt;
α_e	coefficient d'échange de chaleur entre la surface de l'ouvrage et l'air extérieur, en watts par mètre carré kelvin;
k_s	facteur d'absorption du rayonnement solaire (pour la surface de l'ouvrage).

5 Température de l'air extérieur

Les données de référence portant sur la température de l'air extérieur doivent être obtenues sur la base de mesures effectuées dans les stations météorologiques, conformément aux recommandations de l'Organisation météorologique mondiale.

La température de l'air est habituellement enregistrée dans les stations météorologiques à des heures d'observation bien définies, par exemple toutes les heures ou de manière continue. De plus, la température maximale et la température minimale de chaque journée sont enregistrées.

Les données provenant des observations effectuées à partir de certaines stations peuvent être étendues à des régions plus vastes et modifiées en tenant compte des caractéristiques locales (effet de topographie, altitude au-dessus du niveau de la mer, grands réservoirs d'eau). Dans la plupart des cas, on peut laisser de côté les variations spatiales de la température de l'air, en portant son attention sur le problème des variations dans le temps dans la zone géographique donnée.

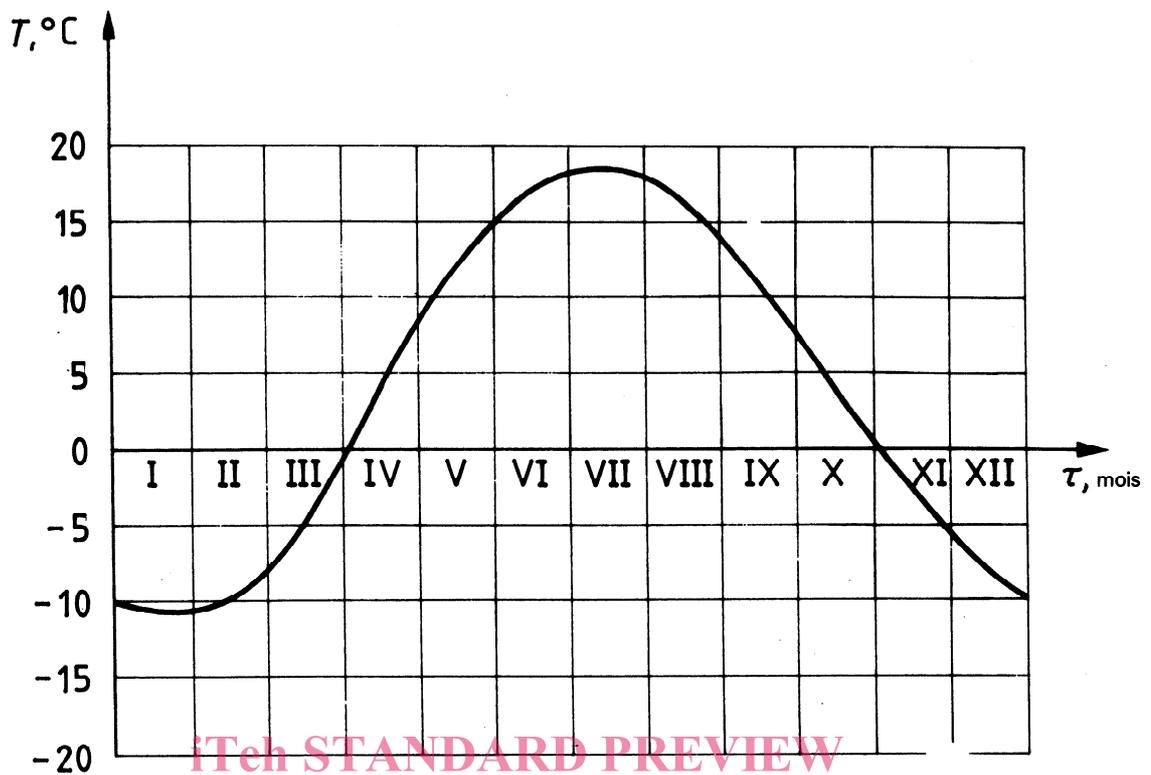
Le niveau de confiance de l'évaluation statistique des paramètres relatifs à la température de l'air dépend de la durée des observations. Pour une analyse statistique des données portant sur la température de l'air, en liaison avec les problèmes de dimensionnement des ouvrages, il faudrait si possible utiliser des données provenant d'observations effectuées sur au moins 25 ans.

Le processus aléatoire de variations de la température de l'air extérieur présente deux variations périodiques: une période annuelle et une période journalière. La « fonction moyenne » de la variation de température (période annuelle), qui montre une relation non aléatoire entre la température et le temps, peut être représentée avec une précision suffisante par une variation harmonique ayant son minimum au cours des mois les plus froids de l'année et son maximum au cours des mois les plus chauds [voir figure 2a)]. Les variations journalières de la température dépendent de la saison et peuvent être analysées par des observations faites au cours d'un mois civil particulier. Il est possible d'obtenir la « fonction moyenne » des variations journalières pour tous les mois de l'année en calculant la moyenne des températures pour chaque heure du jour dans un grand nombre d'exemples pour le mois donné, puis sur un certain nombre d'années. Cette « fonction moyenne » est elle aussi proche de la variation harmonique, avec son minimum au cours des premières heures de la matinée et son maximum au milieu de la journée [voir figure 2b)].

Les variations défavorables non périodiques sont liées aux variations brutales des conditions météorologiques dans des périodes présentant une température moyenne maximale en été et une température moyenne minimale en hiver. Par exemple, l'analyse des variations de la température au cours de ces périodes a permis de découvrir une certaine régularité générale dans la plupart des communes de l'URSS [20], [21].

La « fonction moyenne » des variations défavorables de la température présente la forme d'un « pic de température » avec son maximum (minimum) au milieu (voir figure 3). La durée des pics de température est de 7 à 11 jours. L'amplitude des pics de température varie avec les conditions climatiques et la saison, les pics d'hiver étant en règle générale plus hauts que les pics d'été.

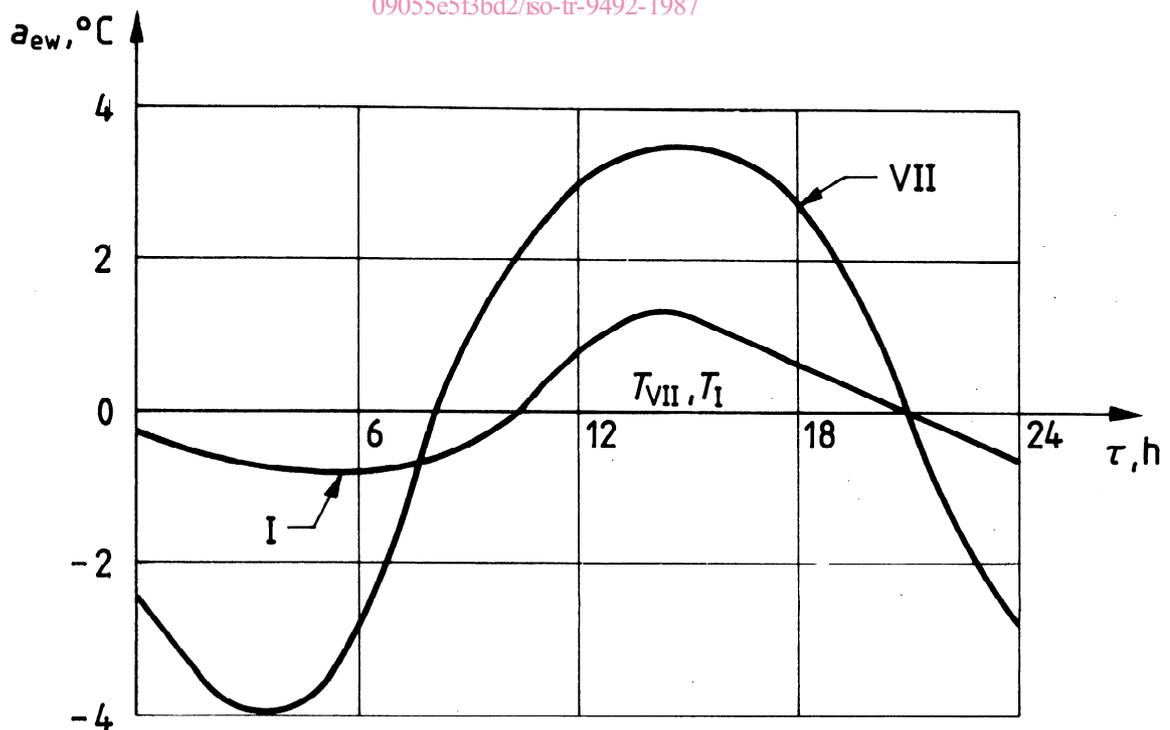
Comme le montrent les observations et les calculs, la température moyenne dans la section transversale des structures ouvertes (non protégées) suit les variations de la température journalière moyenne de l'air extérieur et prend leur valeur. On suppose donc que les variations annuelles de la température de l'air extérieur doivent être caractérisées par une plage de valeurs moyennes journalières extrêmes de température. Il en résulte que l'on doit avoir des valeurs extrêmes de la température journalière moyenne T_{eh} pour la saison chaude et T_{el} pour la saison froide.



a) Graphique donnant les variations de la température moyenne mensuelle de l'air, sur une période de un an, à Moscou

ISO/TR 9492:1987

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d4c0cb24-c590-4c71-a17c-09055e5f3bd2/iso-tr-9492-1987>



b) Graphique donnant les variations de la température horaire moyenne de l'air, pour une journée de janvier (I) et juillet (VII), à Moscou

Figure 2 — Variations de la température de l'air

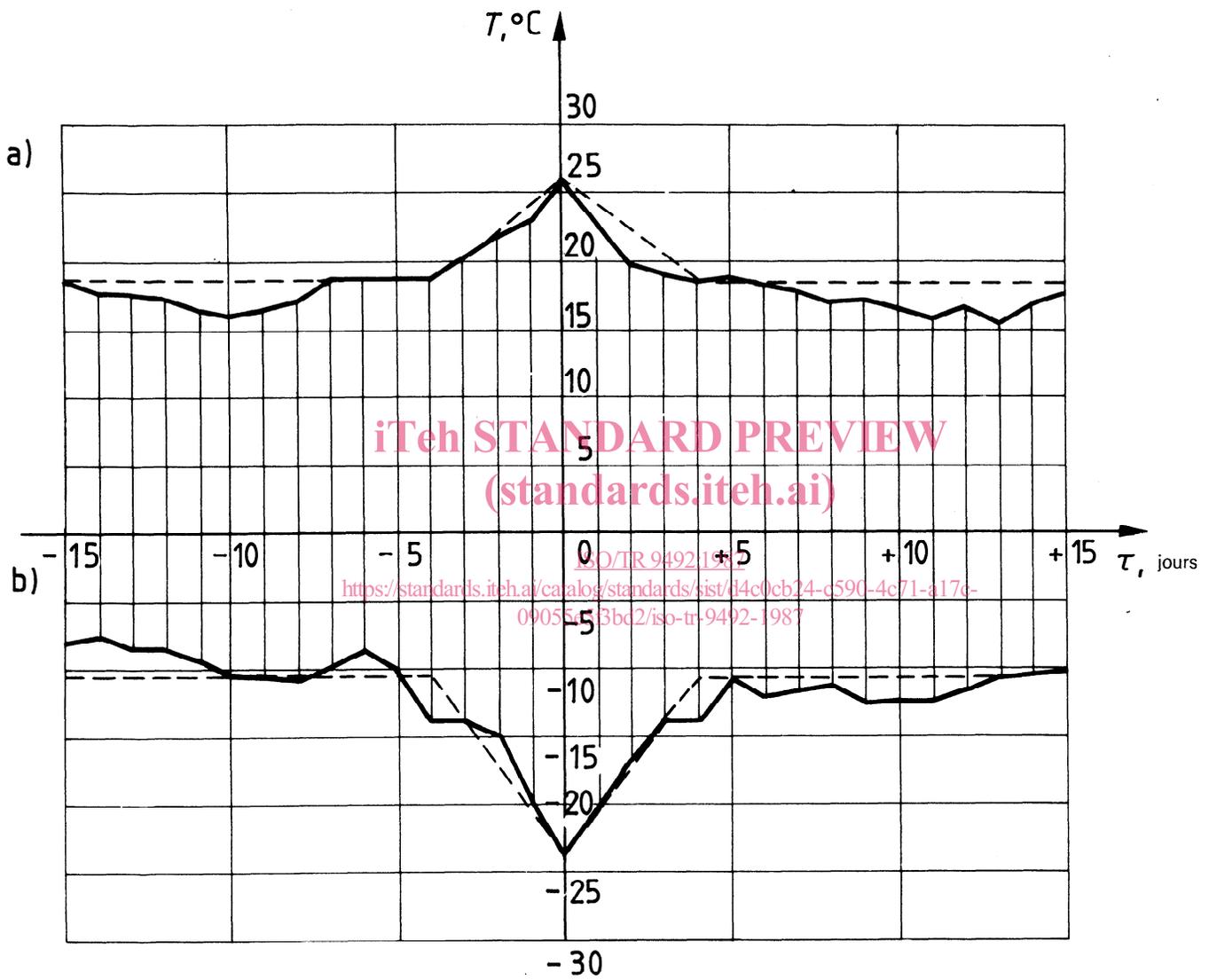


Figure 3 — Graphique donnant les variations les plus défavorables de la température journalière moyenne de l'air —
 a) en été, b) en hiver, à Moscou

Il est recommandé que les valeurs caractéristiques des températures journalières moyennes correspondent à une période de retour de leur dépassement (en valeur absolue) de une fois en N années, conformément à l'ISO 2394 et aux codes nationaux:

$$\left. \begin{aligned} T_{ehk} &= \bar{T}_{eh} + k \hat{T}_{eh} \\ T_{elk} &= \bar{T}_{el} + k \hat{T}_{el} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

où

$\bar{T}_{eh}, \bar{T}_{el}$ sont les valeurs moyennes de la température journalière moyenne extrême;

$\hat{T}_{eh}, \hat{T}_{el}$ sont les écarts-types des températures journalières moyennes extrêmes;

k est le nombre d'écarts-types correspondant à la période de retour N (voir tableau 1), obtenu à partir des formules suivantes:

pour une fonction de distribution normale F :

$$k = F^{-1}[\varphi(x)]$$

pour une distribution doublement exponentielle:

$$k = \frac{\left[-\ln \ln \frac{1}{\varphi(x)} - \gamma \right] \sqrt{6}}{\pi}$$

où $\varphi(x) = 1 - \frac{1}{N(x)}$ et $\gamma = 0,577\ 22$ (constante d'Euler).

iTeh STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)

ISO/TR 9492:1987
Tableau 1

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d4c0cb24-c590-4c71-a17c-09055e5f3bd2/iso-tr-9492-1987>

Périodes de retour, N années	Valeurs de k	
	Pour une distribution normale	Pour une distribution doublement exponentielle
2	0,00	- 0,16
5	0,84	0,72
10	1,23	1,30
20	1,65	1,86
50	2,05	2,58

La température moyenne dans la section transversale de structures massives (par exemple dans les structures des ponts en béton armé) suit les variations de la température journalière moyenne de l'air, avec un certain décalage qui augmente avec l'épaisseur des éléments. Pour le calcul de ces structures, on peut, avec une certaine approximation, utiliser la moyenne des valeurs extrêmes de la température moyenne de l'air, sur des périodes de 3 à 5 jours ou plus, au lieu d'utiliser les valeurs journalières moyennes.

Les variations journalières de la température de l'air extérieur sont définies par l'amplitude journalière, c'est-à-dire par la moitié de la différence entre la température journalière maximale et la température journalière minimale. C'est sous un ciel clair que l'on observe les valeurs les plus importantes de l'amplitude journalière. Il est recommandé d'utiliser les valeurs caractéristiques suivantes de l'amplitude journalière:

$$\left. \begin{aligned} a_{ehk} &= \bar{a}_{eh} + k \hat{a}_{eh} \\ a_{elk} &= \bar{a}_{el} - k \hat{a}_{el} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

où

$\bar{a}_{eh}, \bar{a}_{el}$ sont les valeurs moyennes des amplitudes journalières au cours des mois les plus chauds et au cours des mois les plus froids de l'année;

$\hat{a}_{eh}, \hat{a}_{el}$ sont les écarts-types moyens des amplitudes journalières au cours des mois les plus chauds et au cours des mois les plus froids de l'année.

6 Rayonnement solaire

Les données de référence portant sur le rayonnement solaire de faible longueur d'onde doivent être obtenues à partir d'observations effectuées à l'aide d'un pyrhéliomètre. Ces observations doivent mesurer le rayonnement direct sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil, S , le rayonnement diffusé, D , et le rayonnement total, Q (c'est-à-dire rayonnement direct plus rayonnement diffusé) sur la surface horizontale. Ces paramètres sont enregistrés à des moments définis d'observation, ou en continu. On calcule la moyenne des valeurs de S , de D et de Q chaque mois, ou sur plusieurs années, et les résultats sont donnés dans des tables spécialisées.

Quand on ne dispose pas de données d'observation, on peut obtenir une estimation approximative du rayonnement direct et du rayonnement diffusé à partir d'un nombre minimal de données de référence. Des recherches ont montré [28] que l'on pouvait utiliser la formule empirique suivante pour déterminer l'intensité, S_m , du rayonnement solaire direct sous ciel clair, et si la clarté de l'atmosphère ne change pas pendant la journée;

$$S_m = S_0 / (1 + C_m) \quad \dots (5)$$

où

S_0 est la constante solaire météorologique, égale à 1 256 W/m²;

C est un coefficient qui dépend de la limpidité atmosphérique; pour une limpidité normale $C = 0,31$;

m est le nombre de masses optiques de l'atmosphère à prévoir en fonction de la hauteur h du soleil (voir tableau 2).

Tableau 2

Hauteur de soleil, h degrés	Nombre de masses optiques, m
90,0	1,0
41,7	1,5
30,0	2,0
23,5	2,5
19,3	3,0
16,4	3,5
14,3	4,0
12,6	4,5
11,3	5,0

La hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, h , est obtenue à partir de la formule suivante:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \gamma \quad \dots (6)$$

où

φ est la latitude géographique du lieu;

δ est l'angle de déclinaison du soleil;

γ est l'angle horaire du soleil, en degrés:

$$\gamma = 15 \tau$$

où

τ est le temps, en heures, à partir de midi.

L'intensité du rayonnement solaire direct sur la surface horizontale est:

$$S' = S \sin h \quad \dots (7)$$

L'intensité du rayonnement solaire diffusé sur la surface horizontale est:

$$D = 0,38 CS \quad \dots (8)$$

On obtient l'intensité du rayonnement total, Q , sur la surface horizontale en additionnant (7) et (8):

$$Q = S' + D \quad \dots (8a)$$

La figure 4 présente des courbes donnant l'intensité du rayonnement direct S sur la surface normale au rayon et S' sur une autre surface horizontale, de même que l'intensité du rayonnement diffusé D et du rayonnement total Q sur une surface horizontale, sous un ciel clair et pour une atmosphère de limpidité normale.

Les données portant sur l'intensité du rayonnement solaire direct sur la surface normale aux rayons peuvent être utilisées pour évaluer l'intensité du rayonnement sur des surfaces verticales, S_v , ou inclinées selon une orientation quelconque, S_α , à l'aide des formules suivantes:

$$S_v = S \cos \theta \quad \dots (9)$$

$$S_\alpha = S_v \sin \alpha + S' \cos \alpha \quad \dots (10)$$

où

θ est l'angle entre la direction du rayon solaire et la normale à la surface, au point donné de latitude φ ;

α est l'angle d'inclinaison entre la surface et l'horizon.

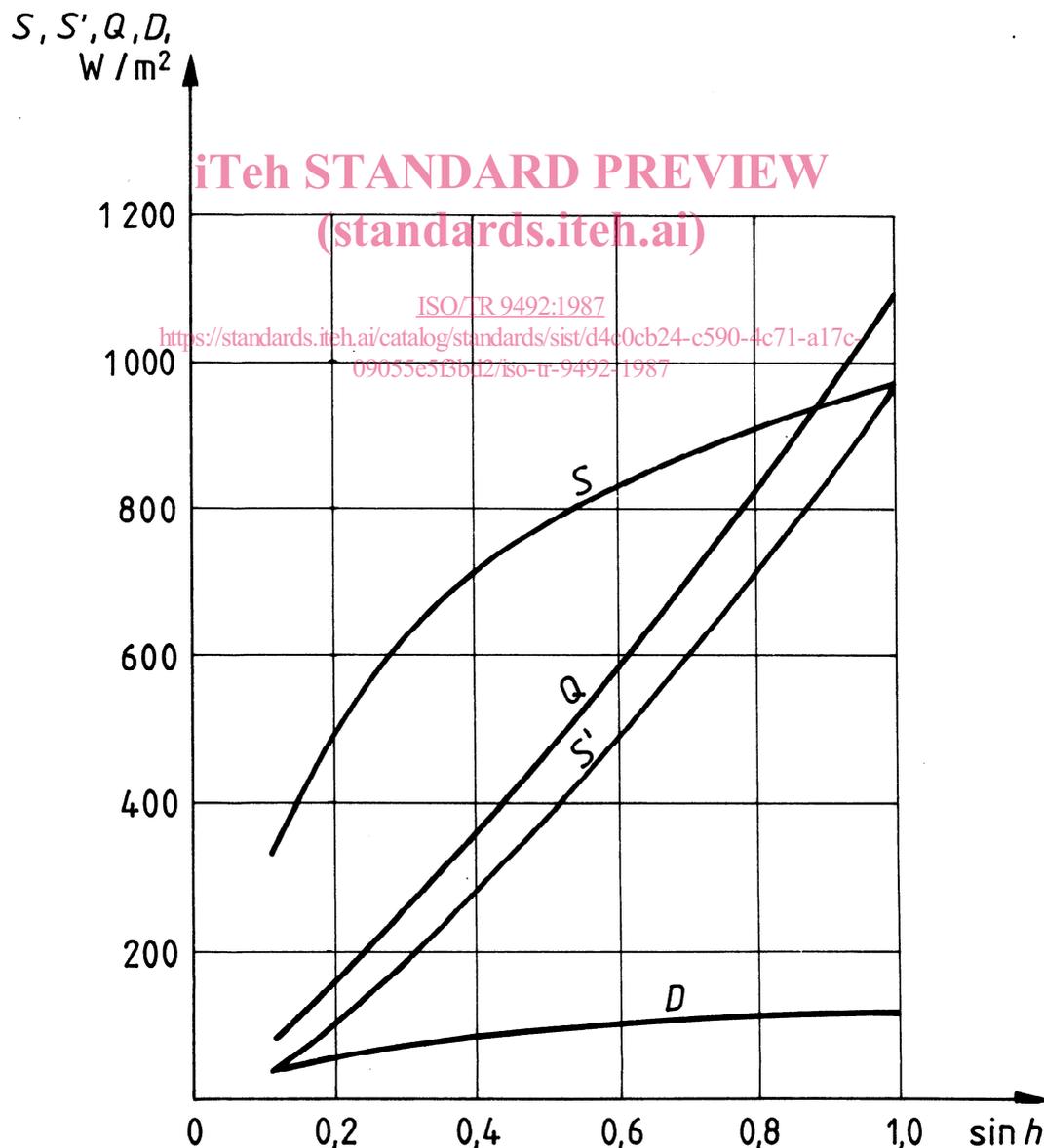


Figure 4 — Courbes donnant l'intensité du rayonnement solaire direct