

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Les températures du sol Williams, G. P.; Gold, L. W.

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

<https://doi.org/10.4224/40000922>

Digeste de la construction au Canada, 1977-02

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=658d37a7-e8ea-4de0-aff7-d7741b9e4347>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=658d37a7-e8ea-4de0-aff7-d7741b9e4347>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

Digeste de la Construction au Canada

Division des recherches en construction, Conseil national de recherches Canada

CBD 180F

Les températures du sol

Publié à l'origine en février 1977

G. P. Williams et L. W. Gold

Veillez noter

Cette publication fait partie d'une série qui a cessé de paraître et qui est archivée en tant que référence historique. Pour savoir si l'information contenue est toujours applicable aux pratiques de construction actuelles, les lecteurs doivent prendre conseil auprès d'experts techniques et juridiques.

La température du sol constitue une donnée essentielle pour l'étude de divers projets de construction; elle est indispensable par exemple pour la conception des pistes d'aéroport et des routes, la détermination de la profondeur à laquelle les canalisations d'alimentation en eau des bâtiments peuvent être installées sans risque de gel, l'excavation des fondations et la conception et la construction des sous-sols des bâtiments. Comme la conservation de l'énergie se révèle de plus en plus nécessaire, les données sur la température du sol sont un aspect important du calcul des besoins énergétiques, par exemple pour déterminer les pertes de chaleur dans les sous-sols ainsi que pour examiner la possibilité d'utilisation du sol comme source pour les pompes à chaleur. Il incombe donc aux ingénieurs et aux architectes qui doivent faire face à ces problèmes de connaître les facteurs déterminant les températures du sol et de savoir comment ces températures varient selon la saison et la profondeur du sol.

Le présent bulletin contient des notions générales sur les températures du sol mesurées au Canada, les facteurs influant sur ces températures ainsi que les limites relatives à leur évaluation et à leur calcul à un endroit précis. Seules les températures du sol des régions de gel saisonnier au sud de la zone de pergélisol sont examinées. Le rapport entre les températures et les problèmes du gel des sols ne fait pas l'objet du présent bulletin, ce sujet ayant déjà été traité au Digest n° **26F**.

Mesure de la température du sol au Canada

Les premières données de ce type à être enregistrées ont été mesurées en 1894, par des chercheurs de l'Université McGill. Depuis lors, les observations n'ont pas été effectuées de façon continue (1) et ce n'est qu'en 1958 qu'un réseau de stations d'observation a été créé. Le Service de l'environnement atmosphérique (S.E.A.) d'Environnement Canada a maintenant mis sur pied un programme d'observations et nombre d'entre elles sont effectuées aux divers postes de recherche du ministère de l'Agriculture. Les données sont mesurées deux fois par jour, à des profondeurs spécifiées allant jusqu'à 150 cm (5 pi) ou 300 cm (10 pi) dans environ soixante stations dans tout le Canada.

Les températures du sol mesurées quotidiennement à chacune des stations sont publiées régulièrement dans le *Monthly Record*, une publication du S.E.A. contenant toutes les statistiques météorologiques portant sur la température de l'air, le vent et les précipitations. Il existe aussi un résumé des températures moyennes du sol mesurées dans toutes les stations et calculées sur une base mensuelle, Pour les années 1958 à 1972 (2).

Diverses autres statistiques sur les températures du sol ont été établies, mais la plupart portent sur une période de temps assez limitée. Dans le cadre d'une étude sur la répartition des zones de pergélisol, la Division des recherches sur le bâtiment a aussi établi des statistiques portant sur plusieurs années et concernant le Nord canadien.

Les statistiques existantes ne peuvent fournir que des renseignements très généraux sur la gamme de températures que l'on peut prévoir dans le cas d'un endroit précis. Les ingénieurs et architectes qui doivent connaître cet aspect à fond sont donc appelés à évaluer la situation à partir de nombreux facteurs qui ont un effet sur la température du sol.

Facteurs influant sur la température du sol

Ces facteurs peuvent être classés selon trois grandes catégories: les variables météorologiques, les variables du terrain et celles du sous-sol. Les différences régionales importantes de température du sol sont principalement déterminées par les variables météorologiques tels le rayonnement solaire, la température de l'air et les précipitations; par ailleurs, les variations locales ou faibles résultent des différences des sols, des caractéristiques de surface et des propriétés thermiques des sols.

Les facteurs météorologiques, plus particulièrement le rayonnement solaire et la température de l'air, influent sur la température de la surface du sol et sur celle du sous-sol en agissant sur le taux de transmission des échanges de chaleur entre l'atmosphère et le sol. Le rayonnement solaire constitue cependant le facteur le plus important. La température moyenne annuelle du sol diffère entre le nord et le sud du Canada, cette variation étant fonction de la quantité d'énergie solaire absorbée à la surface du sol tout au cours de l'année. Une variation cyclique des températures de l'air et de la surface du sol se produit à la suite des changements saisonniers et quotidiens dans le rayonnement solaire. D'autres facteurs météorologiques tels le vent ou la pluie peuvent causer des variations locales assez importantes.

La neige constitue le deuxième facteur en importance qui influe sur la température du sol, non seulement à cause de ses propriétés d'isolant bien connues mais aussi à cause de l'humidité qu'elle dégage dans le sol au dégel. La végétation peut aussi agir comme isolant en protégeant le sol des températures extrêmes qui produisent des taux élevés de transmission de la chaleur. D'autres caractéristiques relatives au terrain, telle l'orientation des pentes, peuvent avoir des effets importants. La température moyenne du sol des pentes exposées au sud est généralement plus élevée que celle des pentes donnant sur le nord. Les effets des caractéristiques du terrain sur la température du sol ont été traités dans de nombreuses publications (3).

Les propriétés du sol déterminant sa réponse aux variations de température en surface sont les suivantes: la capacité de chaleur volumétrique, C_v , la conductivité thermique, K , la chaleur latente (chaleur nécessaire au gel ou dégel d'une unité volumique de sol gelé) et la teneur en eau. Le rapport K/C_v , appelé diffusivité thermique, est un aspect important pour le calcul du taux de transmission de la chaleur dans le sol.

La teneur en eau est une variable et la capacité thermique, la conductivité thermique et la chaleur latente varient aussi puisqu'elles dépendent de la teneur en eau. Ainsi, plus la teneur en eau est élevée, plus la capacité thermique, la conductivité thermique et la chaleur latente sont élevées. La réponse du sol aux variations de température devient plus complexe à cause des changements qui se produisent lors du gel. Ainsi, en plus du fait que la capacité thermique volumétrique et la conductivité thermique de la glace sont différentes de celles de l'eau, le sol peut se gonfler lors du gel puis se tasser lors du dégel.

Le présent bulletin ne traite pas de ces rapports complexes. Cependant, dans la nature, de nombreux facteurs ont tendance à se compenser, ce qui rend généralement possible l'utilisation de formules relativement simples pour l'évaluation des limites de fluctuation des températures du sol.

Comportement général des températures du sol

Les principales caractéristiques des variations entre la température de l'air et celle de la surface du sol peuvent généralement s'exprimer par l'équation suivante:

$$T_s = \bar{T} + A \cos \left[\frac{2\pi t}{t_0} \right]$$

où T_s est la température à un moment précis, \bar{T} la température moyenne pour la période donnée, qui comprend un ou plusieurs cycles complets de variations, A est la différence entre les températures maximale et minimale pour la période donnée, t est la durée et t_0 , la durée d'un cycle complet.

Si les propriétés thermiques du sol sont constantes, la température produite dans le sol par la variation cyclique peut être obtenue par l'équation suivante:

$$T(x, t) = \bar{T} + A \exp \left[-x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_0}} \right] \cos \left[\frac{2\pi t}{t_0} - x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_0}} \right]$$

où x représente la profondeur sous la surface et α , la diffusivité thermique K/C_v .

L'amplitude d'une variation de température à la surface du sol correspond généralement à l'amplitude d'une variation correspondante de la température de l'air. L'équation (2) indique que l'amplitude diminue de façon exponentielle en fonction de l'éloignement de la surface, à un taux prescrit par le temps nécessaire à un cycle complet. Ceci est représenté à la figure 1, dans le cas des variations annuelles. Les températures du sol sont généralement constantes au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5 et 6 m. La température moyenne annuelle du sol est presque constante avec la profondeur; elle augmente toutefois d'environ 1°C par 50 m à cause de la chaleur géothermique provenant du centre de la terre.

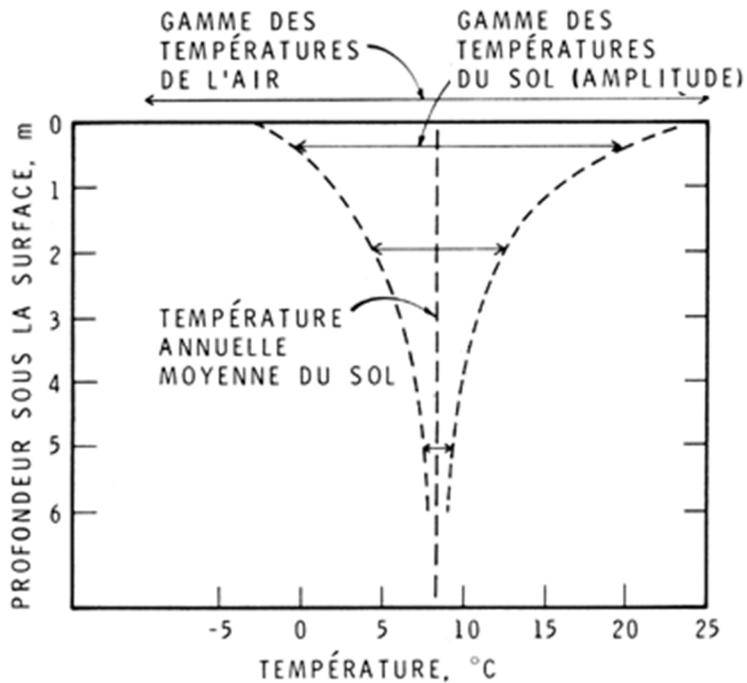


Figure 1. Exemple de la relation entre la profondeur et les températures annuelles du sol - Ottawa

La température de la surface du sol demeure presque en phase avec celle de l'air. Toutefois, les valeurs maximale ou minimale des couches sous la surface sont atteintes plus tard qu'en surface, le retard augmentant linéairement selon la profondeur, comme l'indique le cosinus de l'équation (2). La figure 2 représente ce comportement. A une profondeur de 5 à 6 m, la température maximale du sol est atteinte environ 6 mois après la température maximale moyenne de la surface qui a lieu en été.

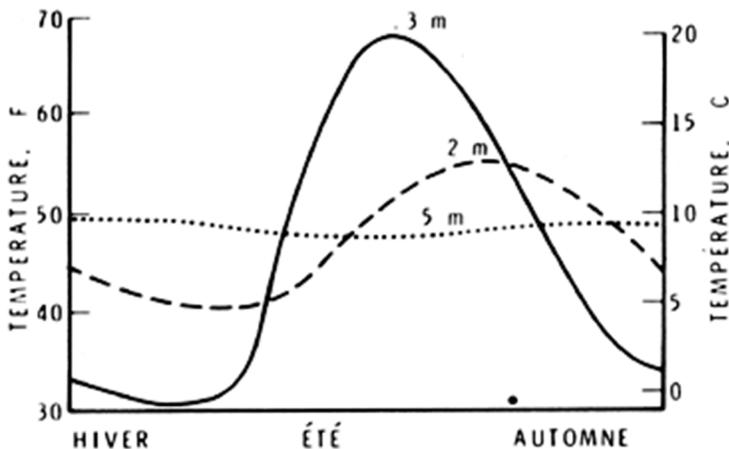


Figure 2 Variation annuelle des températures du sol - Ottawa

La température du sol subit un cycle quotidien et un cycle associé aux variations météorologiques en plus d'un cycle annuel. Ces variations se limitent aux couches près de la surface, les cycles quotidiens se faisant sentir à une profondeur de pénétration d'environ 0.5 m sous la surface et les cycles météorologiques, d'environ 1 m. Les variations quotidiennes constituent un aspect intéressant en ce qui a trait aux problèmes de construction, mais elles sont encore plus utiles pour les agriculteurs. Elles ont d'ailleurs fait l'objet d'études très poussées (4).

Comme la «profondeur de pénétration» désigne la profondeur à laquelle l'amplitude d'une variation de température est réduite à 0.01 de son amplitude en surface, la profondeur de pénétration du cycle quotidien peut être calculée comme étant $7.64 \sqrt{K/C_v}$, celle du cycle annuel correspondant à 19.1 fois cette valeur. Le tableau I indique les valeurs approximatives de la profondeur de pénétration pour divers types de sol ainsi que l'effet des variations de la teneur en humidité.

Tableau I. Profondeur de pénétration des cycles de température quotidiens et annuels

	K/C _v cm ² /sec	Profondeur de pénétration	
		Jour (m)	Année (m)
Roc	0.020	1.10	20.5
Argile humide	0.015	0.95	18.0
Sable humide	0.010	0.80	14.5
Argile sèche	0.002	0.40	6.5
Sable sec	0.001	0.30	4.5

Le rapport entre la température de la surface du sol et celle de l'air est fonction des caractéristiques de la surface et du temps, plus particulièrement la quantité de rayonnement solaire. Habituellement la température moyenne annuelle de l'air est inférieure à celle du sol, cette différence étant principalement attribuable à l'effet isolant de la couche de neige, bien que des facteurs comme l'évaporation entrent aussi en jeu. La température moyenne d'une pelouse bien entretenue en été est sensiblement inférieure à celle d'une surface égouttée, tel un parc de stationnement, car une bonne partie du rayonnement solaire absorbé se dissipe par évaporation ou évapotranspiration.

Dans les régions où la couche de neige est épaisse et continue, la température moyenne annuelle du sol est généralement supérieure à la température moyenne annuelle de l'air, la différence atteignant jusqu'à 5°C; dans les régions côtières, la différence n'est pas supérieure à 1°C. La figure 3 représente les différences observées dans diverses régions. Les variations des propriétés du sol et les caractéristiques de la surface du sol peuvent produire des variations locales sensibles, à l'intérieur même de chaque région.

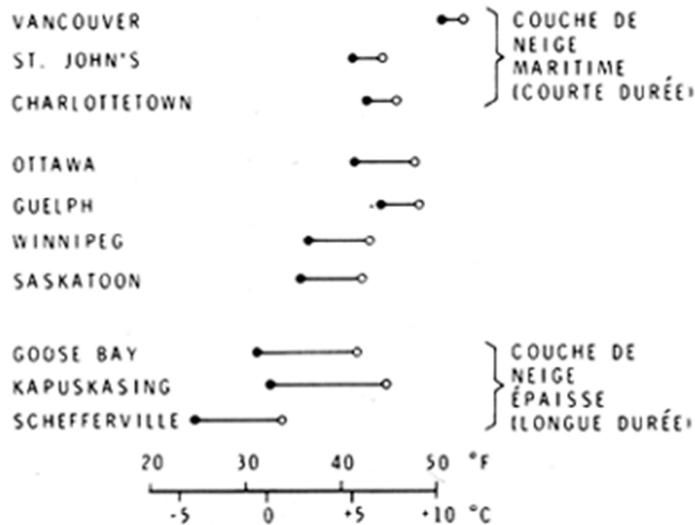


Figure 3. Différence entre la température moyenne annuelle du sol (°) et la température moyenne annuelle de l'air (·)

Calcul de la température du sol

L'analyse de Fourier peut être utilisée pour le calcul des températures du sol dans les cas où la variation de température en surface ne peut être bien exprimée par l'équation (1). Si les propriétés thermiques du sol varient avec le temps, cette méthode peut ne pas être assez précise ou pratique, particulièrement si le gel de l'eau est notable lors de la période de pénétration du gel dans le sol. Des programmes de calcul de la température du sol par ordinateur ont donc été prévus pour les cas les plus complexes. Les méthodes de simulation par ordinateur peuvent être très efficaces pour l'étude de problèmes complexes, par exemple ceux qui portent sur les sols stratifiés, les sous-sols chauffés, les patinoires artificielles, les couches de neige, etc.

Dans la plupart des cas cependant, il n'est pas nécessaire d'utiliser une méthode aussi détaillée, et de simples méthodes graphiques peuvent suffire (5). Si les températures du sol sont déjà connues, on peut utiliser l'équation (2) pour déterminer la température moyenne annuelle du sol et la diffusivité thermique.

Modification de la température du sol

Presque tous les changements autres que les changements naturels apportés au terrain modifient les températures du sol en surface et en profondeur, bien que dans la plupart des cas ces modifications ne soient pas effectuées uniquement dans le but de changer le régime thermique du sol. Il peut toutefois être souhaitable de modifier délibérément la température du sol dans certaines situations, par exemple pour augmenter la capacité thermique du sol en vue de l'utilisation de la chaleur solaire ou modifier des propriétés thermiques du sol pour réduire les pertes thermiques dans les sous-sols des habitations. Il ne faut pas oublier que ces températures ne peuvent être limitées que dans une certaine mesure car l'homme ne maîtrise pas le climat qui est responsable des différences régionales.

Les températures du sol peuvent généralement être modifiées en changeant soit les conditions de la surface du sol, soit les propriétés thermiques du sol. Une couche isolante en surface ou à proximité de celle-ci permet de modifier la condition de la surface, d'où l'utilisation d'isolant sous les chaussées en vue de réduire l'effet du gel. L'augmentation de l'épaisseur de la couche de neige au moyen de clôtures à neige constitue aussi une autre application de ce principe. La meilleure méthode pour modifier la capacité thermique du sol consiste à modifier sa teneur en eau, par exemple en l'inondant. Diverses méthodes de modification des températures du sol ont été mises en application avec succès en agriculture (6) mais leur utilisation ne s'est toutefois pas étendue au domaine de la construction.

Références

1. Crawford, C.B., and R.F. Legget. Ground temperature investigations in Canada. *Engineering Journal*, Vol. 40, No. 3 p. 263-269, Mar. 1957.
2. Aston, D. Soil temperature data 1958-1972. Environment Canada, Atmospheric Environment Service, CLI-2-73, 1973.
3. Gold, L.W. Influence of surface conditions on ground temperatures. *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 4, p. 199-208, Apr. 1967.
4. DeVries, D.A. Thermal properties of soils In *Physics of Plant Environment* (W.R. Van Wijk, Ed.). New York, John Wiley & Sons, 1963, 382 p.
5. Brown, W.G. The temperature under heated or cooled areas on the ground surface. *Trans. Eng. Inst. Canada*, Vol. 6, No. B-14, July 1963.
6. Chang Jen-Hu. Ground temperature, Vol, 1. Harvard University, Blue Hill Meteorological Observatory, 21 June 1958.