



NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

L'économie d'énergie et les toitures Baker, M. C.

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/10.4224/21273142>

Note d'information sur la construction, 1980-05

NRC Publications Record / Notice d'Archives des publications de CNRC:

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=334a0c5c-be73-4c6b-9627-81231d467db9>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=334a0c5c-be73-4c6b-9627-81231d467db9>

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.

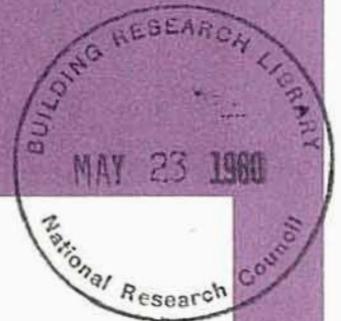


Ref
Ser
TH1
N274

no.6F
BLDG.

IRC PUB

NOTE D'INFORMATION SUR LA CONSTRUCTION



ANALYZED

L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE ET LES TOITURES

par

M.C. Baker

Division des recherches sur le bâtiment
Conseil national de recherches du Canada

Traduit de l'anglais par M.L. Racette

Ottawa, mai 1980

PRÉFACE

La matière de cette communication a été présentée lors de la session technique de la réunion annuelle et la Convention nationale de l'Association canadienne des entrepreneurs en couvertures, tenue à l'hôtel Queen Elizabeth de Montréal, le 16 mai 1977. On a publié le contenu de la présentation dans ce format afin que les couvreurs et les personnes intéressées par le sujet puissent s'en prévaloir.

L'auteur, un membre honoraire de l'Association canadienne des entrepreneurs en couverture, fait partie du Comité technique de l'Association depuis de nombreuses années.

Ottawa
Mai 1980

C.B. Crawford
Directeur
Division des recherches sur le bâtiment
Conseil national de recherches du Canada

L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE ET LES TOITURES

par

M.C. Baker

On construit des bâtiments afin de protéger les gens et leurs biens de certains aspects des conditions météorologiques. Les murs, les fenêtres et la toiture du bâtiment séparent l'environnement intérieur (habituellement réglé) de l'environnement naturel (variable) extérieur (fig. 1).

Des installations de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air règlent l'environnement intérieur. Puisque le chauffage et le refroidissement coûtent chers, l'enceinte du bâtiment doit être efficace au regard de l'isolation thermique. Il est donc important d'utiliser des matériaux possédant une résistance élevée au flux de chaleur afin de garder la chaleur à l'intérieur par temps froid et à l'extérieur par temps chaud (fig. 2).

Le besoin d'isolation thermique des bâtiments au Canada a été pris pour acquis pendant des années. La plupart des personnes acceptent qu'un bâtiment bien isolé entraîne moins de dépenses en chauffage ou en refroidissement, et que de tels bâtiments sont plus confortables pour y vivre et y travailler. Alors, pourquoi faire un tas d'histoires au sujet de l'économie d'énergie?

Premièrement, malgré une connaissance générale de l'isolation thermique des bâtiments, certains propriétaires ne tiennent pas compte ou évitent intentionnellement d'isoler afin de ménager sur les coûts initiaux du bâtiment. Même en utilisant de l'isolant thermique, la quantité minimale nécessaire pour un confort raisonnable s'avère le critère de mise, sans considération réelle pour le coût d'efficacité. Même lorsque le coût d'efficacité était considéré par le passé, la conception erronée très répandue selon laquelle il s'appliquait seulement aux premiers un ou deux pouces d'isolation, déterminait en grande partie la quantité utilisée.

Deuxièmement, le public n'a pris conscience que récemment de la rareté et du prix croissants de l'énergie. On prédit que les ressources de mazout et de gaz naturel s'épuiseront dans les cinquante ou soixante prochaines années. Donc, d'autres sources d'énergie pour le chauffage et

le refroidissement des bâtiments devront être mises au point. La plupart des bâtiments existants utilisent beaucoup plus d'énergie que nécessaire et plusieurs en gaspillent beaucoup: voilà un problème sociologique urgent. Certains croient que l'économie d'énergie constitue le seul moyen de parer à un désastre économique.

Les propriétaires et les concepteurs doivent donc réexaminer le paramètre coût-efficacité de l'isolation. Le concept selon lequel un propriétaire de bâtiment peut réaliser un profit maximal en prévoyant les conditions intérieures désirées à un coût en capital le moins élevé pour le bâtiment et pour l'installation de

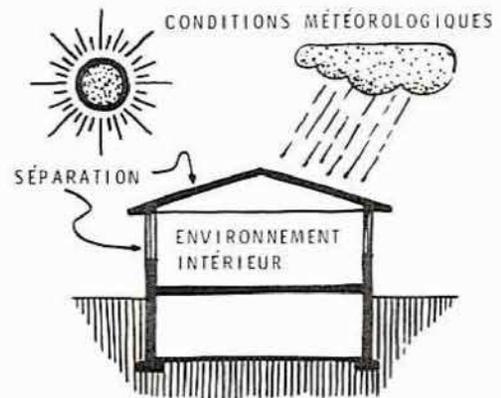


FIGURE 1

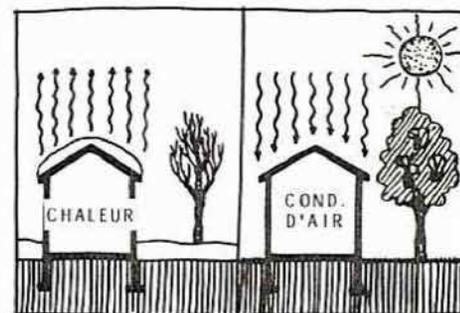
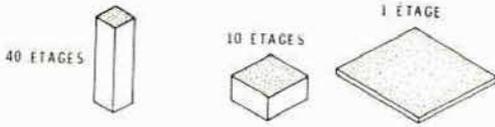


FIGURE 2

chauffage et de conditionnement d'air et au coût annuel le plus bas pour l'exploitation et le financement sur la durée prévue du bâtiment n'est pas nouveau. Par le passé, la plupart des propriétaires et des concepteurs ne prirent pas au sérieux cette approche au coût de la "durée utile" dès la conception du bâtiment et ils contribuèrent à précipiter la crise énergétique actuelle. Une telle analyse du coût montre fréquemment qu'un coût de construction plus élevé afin de rendre l'enceinte du bâtiment efficace au point de vue du rendement thermique peut résulter en épargnes nettes à cause d'une baisse de la demande en combustible pour le chauffage et le refroidissement sur la période de vie utile prévue du bâtiment. En autres mots, un bon rendement thermique signifie un rendement plus économique. Mise à part la possibilité d'épargner de l'argent à long terme en améliorant l'isolation thermique, bientôt des lignes de conduite ou des normes en matière d'économie d'énergie ayant force de loi contribueront à étirer nos ressources qui diminuent. Bien qu'il semble que la construction de nouveaux bâtiments soit à la baisse, la rénovation des bâtiments est à la hausse et ceux-ci devront certainement être améliorés du point de vue de leur rendement thermique.

L'importance du toit par rapport au reste du bâtiment dépend de la forme du bâtiment. On peut le constater en examinant trois bâtiments d'un volume équivalent, soit de 40 étages, 10 étages et 1 étage de hauteur (fig. 3). Les surfaces exposées des bâtiments exprimées en pourcentage de la surface de plancher brute sont respectivement 42,5, 30 et 118 pour cent. Ce rapport a une importance considérable au regard de l'économie d'énergie puisque la perte de chaleur s'avère une fonction de la quantité de surface exposée; les gains de chaleur par les occupants, les lumières et les installations sont reliés à la surface de plancher. Un bâtiment ayant un rapport élevé de surface d'exposition à la surface de plancher n'aura qu'une petite partie de ses pertes compensée par la chaleur produite par les activités internes. Il est donc approprié, et très probable, que les normes pour ce type de bâtiment exigeront une résistance thermique plus élevée de l'enveloppe extérieure que pour les bâtiments dont les rapports de surface exposée à la surface de plancher sont bas. Tous les bâtiments d'un étage, peu importe la grandeur, les bâtiments peu élevés de grandeur moyenne et la plupart des maisons appartiennent à cette catégorie de rapports élevés. Ces bâtiments ont habituellement une grande surface de toit. Dans les bâtiments élevés, le toit représente seulement 6 pour cent, de la

surface exposée, alors que dans le bâtiment moyen il totalise 33 pour cent et dans le bâtiment d'un étage, 85 pour cent.



LONGUEUR, PI	100	200	500
LARGEUR, PI	100	200	400
HAUTEUR, PI	400	100	20
VOLUME, PI ³	4 000 000	4 000 000	4 000 000
SURFACE DE PLANCHER, PI ²	400 000	400 000	200 000
SURFACE EXPOSÉE, PI ²	170 000	120 000	236 000
SURFACE EXPOSÉE/ SURFACE DE PLANCHER	42.5%	30%	118%
SURFACE DE TOIT, PI ²	10 000	40 000	200 000
SURFACE DE TOIT/ SURFACE DE PLANCHER	2.5%	10%	100%
SURFACE DE TOIT/ SURFACE EXPOSÉE	5.9%	33%	84.7%

FIGURE 3

Transfert de chaleur

Si l'on doit considérer les économies d'énergie réalisables en utilisant l'isolation, certains principes fondamentaux du transfert de chaleur doivent être compris. Le transfert de chaleur est une simple expression de génie mécanique ayant rapport à où va la chaleur, comment elle s'écoule et comment elle peut être retenue. Un premier principe fondamental est que l'énergie calorifique s'écoule toujours du chaud vers le froid et que rien ne peut l'en empêcher. Toute la chaleur donnée à un bâtiment, à la longue, s'échappera vers l'extérieur, mais il est possible de la retenir pour un temps par isolation thermique de façon à ce que beaucoup moins de chaleur s'échappe à chaque heure, à chaque jour ou à chaque hiver. Si on parvenait à ralentir l'écoulement de chaleur par le toit, l'installation de chauffage fournirait moins de

chaleur pour maintenir le confort. De même, en été, si le flux de chaleur s'infiltrant dans le bâtiment par le toit pouvait être ralenti, la quantité d'énergie nécessaire au conditionnement d'air serait réduite.

Comment la chaleur s'échappe-t-elle? Tout écoulement de chaleur se fait par conduction, convection ou rayonnement, mais la conduction s'avère le mode privilégié dans les matériaux de construction massifs.

La conduction se définit comme le transfert ou l'écoulement de chaleur à travers un matériau quelconque, par le contact direct de particule à particule ou de molécule à molécule (fig. 4). L'activité moléculaire dépend de la température. La chaleur absorbée à un endroit active les molécules qui se transmettent l'énergie d'une molécule à l'autre. Par exemple, en chauffant une barre d'un bon matériau conducteur comme du métal à un endroit précis, la chaleur s'étend rapidement le long de toute la barre par activité moléculaire. C'est la seule méthode par laquelle la chaleur peut s'écouler à travers un solide opaque. La chaleur peut aussi passer par conduction d'un matériau à un autre avec lequel il serait en contact.

La convection est l'entraînement de chaleur par le mouvement d'un liquide ou d'un gaz (fig. 5). Si le liquide ou le gaz entre en contact avec une surface chauffée, il se réchauffe et monte, créant ainsi un courant de convection qui, à son tour, peut transférer la chaleur à n'importe quelle autre surface plus froide. Si le courant de convection refroidit au contact d'une surface plus froide, la convection se fera vers le bas. Les courants de convection formés dans les vides entre les éléments de murs ou de toits peuvent transférer la chaleur du côté chaud vers le côté froid. Les fuites d'air à travers les fissures et les ouvertures transmettent aussi la chaleur par convection.

Le rayonnement s'effectue par un transfert calorifique sous forme d'ondes électromagnétiques dans l'air ou dans un vide (fig. 6). Tous les corps subissent continuellement une perte d'énergie puisqu'ils émettent des radiations; par ailleurs, les corps compensent cette perte en absorbant la chaleur émise par d'autres corps. Le rayonnement par ondes courtes vient du soleil à travers un espace vide et une partie du rayonnement est absorbée par les bâtiments et réchauffe les matériaux. Les matériaux du bâtiment peuvent également transférer l'énergie calorifique par grandes ondes à travers les espaces d'air dans le bâtiment.

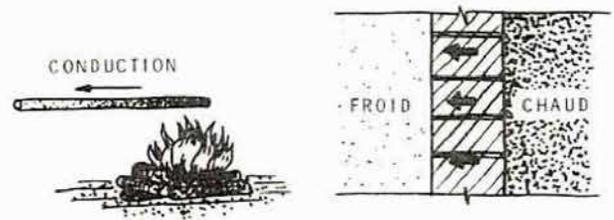


FIGURE 4

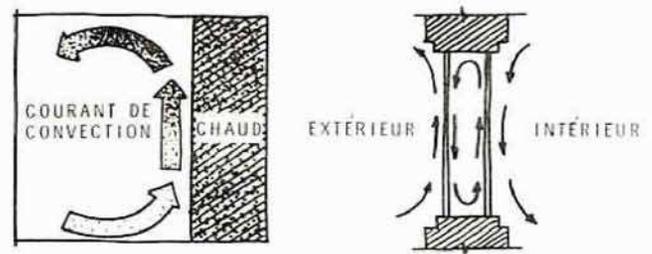


FIGURE 5

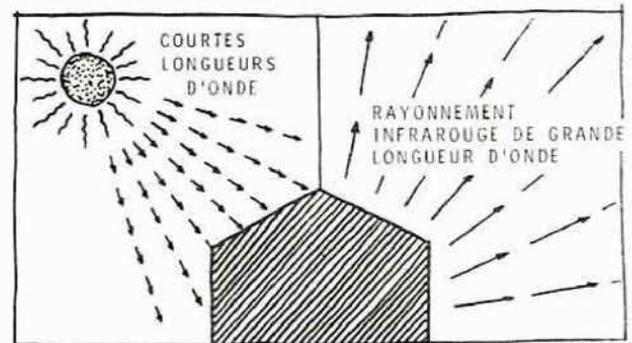
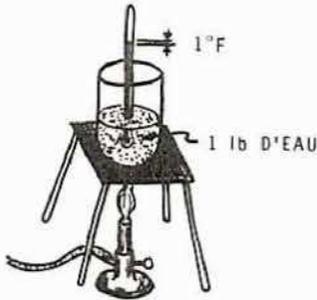


FIGURE 6

Peu importe le mode, l'écoulement de chaleur représente une perte ou un gain d'énergie et habituellement signifie de plus grandes dépenses en combustible-dollars pour le chauffage ou le refroidissement. Heureusement, on peut facilement ralentir l'écoulement de la chaleur en se servant de matériaux et de méthodes bien connus. L'isolation thermique est le principal moyen de ralentir l'écoulement de chaleur d'un toit. Avant de procéder à l'évaluation des pertes ou des gains de chaleur et du coût de chauffage, il faut comprendre quelques termes utilisés lors du calcul.

Le British Thermal Unit, Btu, représente l'unité de mesure de l'énergie calorifique (fig. 7). Un Btu représente la quantité de chaleur nécessaire pour faire monter la température d'une livre d'eau de 1°F. Cette unité sert

à décrire le contenu calorifique d'un combustible et l'écoulement de chaleur à travers des matériaux et des enveloppes de bâtiment.



BRITISH THERMAL UNIT (Btu)
QUANTITÉ DE CHALEUR NÉCESSAIRE POUR MONTER
LA TEMPÉRATURE D'UNE LIVRE D'EAU DE 1°F

FIGURE 7

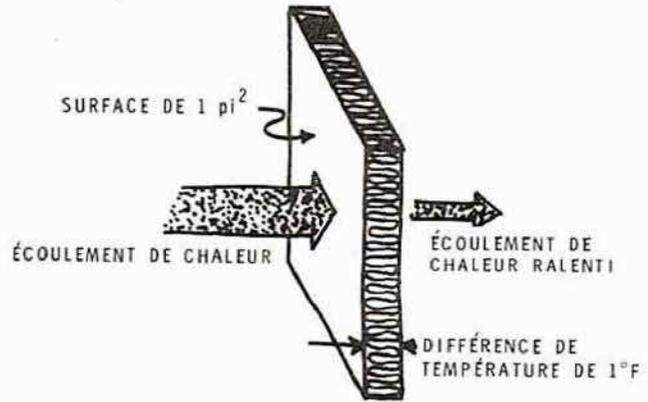
La résistance thermique, (R), indique la résistance au transfert de chaleur d'un pied carré de matériau pour chaque différence de température d'un degré Fahrenheit entre les faces d'un matériau (fig. 8). Aujourd'hui, on décrit la plupart des isolants par leur valeur R. Tous les matériaux entrant dans la construction d'un toit possèdent une résistance à l'écoulement de chaleur comme les espaces d'air et les pellicules d'air à la surface du toit et du plafond. Un assez bon isolant d'un pouce d'épaisseur a une valeur R d'environ 3 ou 4. On comprend facilement ce concept, mais malheureusement d'autres unités entrent en ligne de compte dans l'analyse du transfert de chaleur.

La conductivité thermique est l'unité de base de l'écoulement de chaleur. C'est la mesure du nombre de Btu transmis à travers un pied carré de matériau d'un pouce d'épaisseur, en une heure, lorsque la différence de température entre les surfaces opposées est de 1°F. On représente la conductivité comme le facteur k d'un matériau (fig. 9).

En analysant l'écoulement de chaleur d'une toiture, la valeur k ou R de chacun des matériaux qui la compose doit-être considérée. Un rapport étroit relie ces deux facteurs; la valeur R d'un matériau quelconque est simplement l'inverse de la valeur k

($R = \frac{1}{k}$ ou $k = \frac{1}{R}$). Afin de déterminer l'efficacité d'une toiture ou d'un mur à diminuer le flux de chaleur, on doit additionner l'efficacité

de chaque élément (fig. 10). On peut seulement le faire en calculant les résistances, car les valeurs k ne peuvent pas être additionnées ensemble. La somme des résistances de la couche d'air à la surface du toit, de la membrane de couverture, de l'isolant, de la dalle, de toutes les lames d'air, du plafond et de la couche d'air intérieure donne la résistance thermique de tout l'assemblage. Cette méthode permet de calculer l'écoulement de chaleur total de la toiture.



RÉSISTANCE THERMIQUE

FIGURE 8

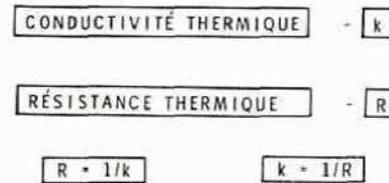
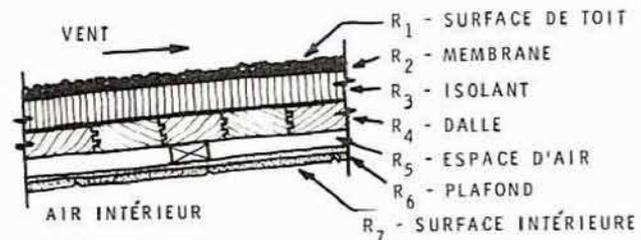


FIGURE 9



TOTAL R = R₁ + R₂ + R₃ + R₄ + R₅ + R₆ + R₇
U = 1/R

FIGURE 10

Ce coefficient de transmission thermique global, identifié habituellement comme le coefficient U, est la vitesse d'écoulement thermique en Btu par heure à travers une surface d'un pied carré selon des conditions constantes entre l'air à l'intérieur du toit et l'air à l'extérieur, pour chaque différence de température de 1°F entre l'intérieur et l'extérieur.

Le coefficient U est $\frac{1}{R}$, où R représente la résistance thermique totale de la toiture décrite plus haut. Cette valeur du système de toit existant doit être connue avant toute modification au toit; ensuite les coûts et les économies réalisables pourront être déterminés selon les changements à apporter à la toiture.

Degrés-jours de chauffage

Jusqu'ici la discussion a porté sur la situation en général, mais pour tout bâtiment on doit tenir compte de l'emplacement, car le climat influence les pertes ou les gains de chaleur du bâtiment et conséquemment ses demandes d'énergie. La durée et la rigueur de la saison de chauffage ou de refroidissement, le coût du combustible utilisé et l'efficacité de l'installation de chauffage ou de refroidissement influencent les coûts d'exploitation du chauffage ou du refroidissement. La température influence de plus le chauffage et on en mesure l'effet en degrés-jours. Lorsque ce concept a vu le jour, on allumait habituellement le chauffage quand la température journalière moyenne ne dépassait pas 65°F. On utilisait surtout cette température, par la suite, pour déterminer les degrés-jours. Pour chaque jour de chauffage, le nombre de degrés-jours est égal à la différence en degrés Fahrenheit entre 65°F et la température moyenne lorsqu'elle se situe sous 65°F. Si pour une journée d'hiver donnée la température moyenne est 35°F par exemple, cette journée représente 30 degrés-jours. Les degrés-jours de la saison de chauffage équivalent à la somme des valeurs quotidiennes. Chaque station météorologique enregistre ces données importantes et un tableau des degrés-jours sous 65°F de la plupart des régions au Canada paraît dans un supplément du Code national du bâtiment du Canada. Les valeurs de villes représentatives de chaque province figurent au tableau I. Dans certains calculs, la base de 65°F s'avère aujourd'hui insuffisamment précise; on peut maintenant se procurer des tableaux fondés sur une base de température différente et certaines formules de calcul de l'énergie utilisant les degrés-jours basés sur 65°F avec un facteur de conversion tenant compte des imprécisions.

Le coût du chauffage

La plupart des bâtiments au Canada sont chauffés au mazout ou au gaz naturel. Le prix de ces combustibles et de l'électricité monte encore et il semblerait que cette tendance se maintienne. On peut difficilement prévoir le prix de ces ressources, mais on doit faire une approximation avant de procéder à une analyse sérieuse de l'amélioration du rendement thermique de bâtiments nouveaux ou existants. Les experts prévoient que le prix du mazout montera rapidement dans les années à venir, probablement de 20 pour cent par année, jusqu'à parité avec le prix de l'électricité qui selon les prévisions continuera d'augmenter à un taux assez régulier de 12 pour cent par année (fig. 11). La représentation graphique montre des augmentations de 20 pour cent et 15 pour cent et indique qu'au pourcentage d'augmentation le moins élevé, le prix du mazout rejoindra quand même à la longue celui de l'électricité, mais moins rapidement. Le gaz naturel est actuellement moins coûteux que le mazout, mais tout porte à croire que son prix augmentera aussi jusqu'à parité avec les autres ressources. A ce moment, on suppose que le chauffage augmentera d'environ 12 pour cent par année.

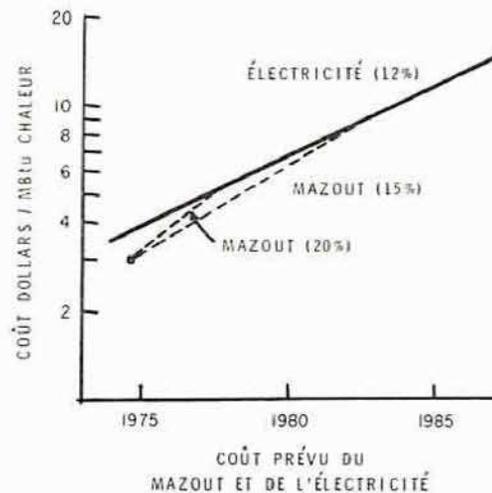


FIGURE 11

L'efficacité d'une installation de chauffage

Le pouvoir calorifique des combustibles varie un peu, mais le tableau II, qui tire ses données du "Guide of the American Society for Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers," donne des valeurs raisonnables à utiliser pour le calcul. Si le pouvoir calorifique exact du combustible employé pouvait être obtenu, il serait préférable d'en tenir compte.

TABLEAU I

DEGRÉS-JOURS SOUS 65°F - ENDROITS CHOISIS AU CANADA

Endroit	Degrés-jours F	Endroit	Degrés-jours F
<u>Territoires du Nord-Ouest</u>		<u>Ontario</u>	
Alert	23 488	Kenora	10 796
Frobisher Bay	17 876	Ottawa	8 693
		Timmins	11 400
<u>Yukon</u>		Toronto	6 827
Dawson	15 067	Welland	6 691
Whitehorse	12 475		
<u>Terre-Neuve</u>		<u>Manitoba</u>	
Grand Falls	9 352	Churchill	16 728
Labrador City	14 200	Morden	10 068
St. John's	8 991	Thompson	13 900
		Winnipeg	10 679
<u>Ile du Prince-Édouard</u>		<u>Saskatchewan</u>	
Charlottetown	8 486	Maple Creek	9 500
<u>Nouvelle-Écosse</u>		North Battleford	11 082
Halifax	7 361	Regina	10 806
Sydney	8 049	Saskatoon	10 856
Yarmouth	7 340		
<u>Nouveau-Brunswick</u>		<u>Alberta</u>	
Edmundston	9 796	Calgary	9 703
Fredericton	8 671	Edmonton	10 268
Saint John	8 453	Fort Vermilion	13 113
		Lethbridge	8 644
<u>Québec</u>		<u>Colombie-Britannique</u>	
Drummondville	8 700	Fort Nelson	12 777
Gaspé	9 800	Kamloops	6 799
Montréal	8 200	Prince George	9 755
Québec	8 937	Vancouver	5 515
Sept-Îles	11 327		

TABLEAU II

VALEURS DE CHAUFFAGE ET FACTEUR COÛT DES COMBUSTIBLES

Combustible	Btu	Coût par Btu
Anthracite	12 910/lb	0.000 077 4 x coût/lb
Charbon bitumineux	9 150/lb	0.000 109 2 x coût/lb
Mazout n° 2 (léger)	168 000/gal	0.000 005 9 x coût/gal
Mazout n° 5 (industriel)	180 000/gal	0.000 005 5 x coût/gal
Mazout n° 6 (industriel)	184 000/gal	0.000 005 4 x coût/gal
Gaz naturel	1 000/pi ³	0.001 x coût/pi ³
Gaz de pétrole liquéfié	91 690/gal	0.000 010 9 x coût/gal
Vapeur	1 000/lb	0.001 x coût/lb
Électricité	3 413/kW·h	0.000 293 x coût/kW·h

Le tableau II indique que le pouvoir calorifique du mazout s'échelonne de 168 000 à 184 000 Btu par gallon canadien, selon le type. Le mazout domestique ordinaire n° 2 a un pouvoir calorifique de 168 000 Btu.

En plus du pouvoir calorifique du combustible, il faut tenir compte de l'efficacité d'exploitation. Les installations de chauffage, même lorsqu'elles sont bien conçues et entretenues, ne donnent pas un rendement parfait. Le rendement nominal atteint rarement plus de 80 pour cent même avec une exploitation continue à pleine capacité. Le rendement saisonnier nominal peut diminuer à trois quarts de la capacité nominale ou moins. Des pourcentages typiques de rendement nominal apparaissent au tableau III qui tire ses chiffres du guide ASHRAE. Les valeurs moins élevées reflètent probablement le mieux le rendement saisonnier.

Quantité de mazout consommée

Voici une formule pour déterminer la quantité de mazout consommée par année:

$$Q = \frac{D \times 24}{R \times H \times E}$$

où:

Q = consommation de mazout, gallons par pied carré

D = degrés-jours sous 65°F par année

24 = facteur de conversion (pour les bâtiments résidentiels et certains autres bâtiments, la valeur peut être moins élevée)

R = résistance totale du toit à l'écoulement de chaleur

H = dégagement calorifique du mazout, Btu par gallon

E = rendement du chauffage saisonnier

$$\text{CONSUMMATION DE MAZOUT} = \frac{\text{DEGRÉS-JOURS} \times 24}{\text{RÉSISTANCE} \times \text{POUVOIR CALORIFIQUE D'UN COMBUSTIBLE} \times \text{RENDEMENT}} \text{ GAL/ANNÉE/PI}^2$$

Un exemple réel d'amélioration du rendement thermique d'un bâtiment

Voici une église avec un toit en bardeaux d'asphalte vieux de vingt ans qui doit être remplacé (fig. 12). La construction, de l'extérieur vers l'intérieur, consiste en bardeaux d'asphalte, en planches de bois emboutées, de 2 po d'épaisseur en fourrures de 2 po sur 3 po formant l'espace d'air en un contreplaqué de finition en pin de 3/8 po d'épaisseur.

TABLEAU III

EFFICACITÉ DES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE

Anthracite alimenté à la main	60-75%
Charbon bitumineux alimenté à la main	50-65
Charbon - chauffeur automatique	60-75
Mazout ou gaz naturel	70-80
Installation conçue pour chauffer au gaz	75-80
Installation convertie au chauffage au gaz	60-80
Installation conçue pour chauffer au mazout	65-80
Installation convertie au chauffage au mazout	60-80
Électricité directe	Près de 100%

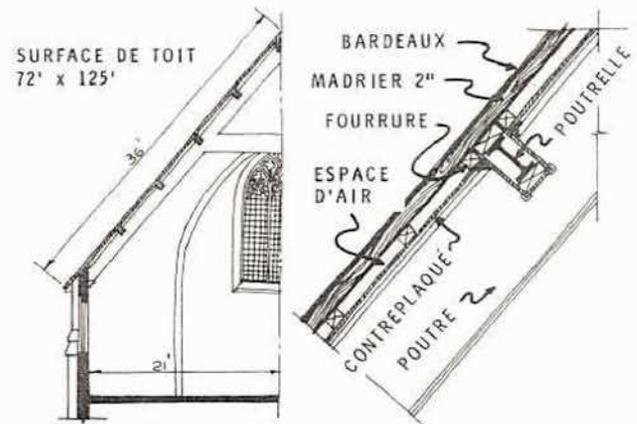


FIGURE 12

La surface du toit est de 72 sur 125 pi = 9000 pi². La congrégation voudrait savoir s'il serait préférable d'isoler en même temps que de remplacer le toit.

La première étape consiste à déterminer la résistance à l'écoulement de chaleur du toit existant et de la désigner par R_g. Aux tableaux IV, V et VI figurent les valeurs de la résistance thermique des couches d'air, des espaces d'air et des matériaux typiques de couverture.

TABLEAU V RÉSISTANCE DES ESPACES D'AIR

Lame d'air extérieure (vent de 7½ m/h)	0.25
Bardeaux d'asphalte	0.44
Madriers de 2 po	2.50
Espace d'air	0.90
Contreplaqué	0.47
Lame d'air intérieure	0.62
R_E TOTAL	<u>5.18</u>

Ce toit ne fournit pas un rendement thermique très efficace si l'on considère qu'un pouce d'isolant en fibre de verre possède une valeur R d'environ 3 et le polystyrène moulé par pression, une valeur R d'environ 5.

On peut maintenant évaluer la quantité de combustible consommée par rapport à Ottawa, où l'église est située, en utilisant la formule décrite plus tôt:

$$Q = \frac{D \times 24}{R \times H \times E} \text{ gal/année/pi}^2$$

$$= \frac{8\,690 \times 24}{168\,000 \times 0.6} \times \frac{1}{R_E}$$

$$= \frac{2.069}{R_E} = \frac{2.069}{5.18} = 0.399 \text{ gal/année/pi}^2$$

Dans la formule pour Q, puisque D, H et E sont constants, il est commode d'exprimer Q comme une constante divisée par la résistance (R), la seule valeur qui changera avec l'amélioration du rendement thermique.

TABLEAU IV RÉSISTANCE DE LA LAME D'AIR AUX SURFACES POUR LES TOITS

Surface	Conditions	Pente de	
		Plat	45°
A l'extérieur, à la surface de la couverture	Vent de 15 m/h pour l'hiver	0.17	0.17
	Vent de 7½ m/h pour l'été	0.25	0.25
A l'intérieur, à la surface du plafond	Écoulement de chaleur, élevé en hiver	0.61	0.62
	Écoulement de chaleur, bas en été	0.92	0.76

Remarque: Les valeurs sont pour des matériaux de construction non-réfléchissants ayant une émission en surface de 0.90.

Toit	Conditions	Résistance	
		Espace de ¾ po	Espace de 4 po
Plat	Écoulement de chaleur, élevé en hiver	0.87	0.94
	Écoulement de chaleur, bas en été	0.84	0.99
Pente de 45°	Écoulement de chaleur, élevé en hiver	0.94	0.96
	Écoulement de chaleur, bas en été	0.84	0.90

Remarque: 1. En supposant que les deux surfaces de l'espace d'air sont composées de matériaux de construction non-réfléchissants.

2. Les espaces d'air ne doivent pas ventiler à l'intérieur ou à l'extérieur, ni servir de plénum. L'air doit rester immobile.

TABLEAU VI RÉSISTANCE THERMIQUE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Matériau	R
Tablier	Négligeable
Dalle de béton de 4 po	0.32
Madrier (par pouce)	1.25
Béton au plâtre (par pouce)	0.60
Béton isolant de zonolite ou de perlite à 30 lb/pi ³ (par pouce)	1.41
Contreplaqué (par 1/8 po)	0.16
Planche de gypse (par 1/2 po)	0.45
Enduit de gypse (par 3/4 po)	0.47
Coupe-vapeur	Négligeable
Panneau de fibre (par pouce)	2.78
Panneau de perlite (par pouce)	2.78
Fibre de verre (par pouce)	3.00
Laine minérale (par pouce)	3.00
Mousse de verre (par pouce)	2.63
Uréthane (par pouce)	6.25
Panneau de polystyrène en grain (par pouce)	3.50
Polystyrène extrudé (par pouce)	5.00
Étanchéité multicouches (par pli)	0.08
Bardeaux d'asphalte	0.44
Bardeaux de bois	0.94

La manière la plus logique d'améliorer le rendement thermique de ce toit serait de garder le système en place, clouer des membres de 2 po sur 2 po ou de 2 po sur 4 po à la dalle, remplir l'espace entre les membres de bois d'isolant thermique, recouvrir de contreplaqué et finalement poser les bardeaux d'asphalte ou un autre matériau de couverture (fig. 13). Afin d'isoler les vieux matériaux des nouveaux et de fournir un bon coupe-vapeur, il est conseillé d'appliquer un polyéthylène épais par-dessus les vieux bardeaux avant que la nouvelle couverture ne soit installée. Les membres de bois de 2 po sur 2 po permettent d'installer 1½ po d'isolant tandis que les 2 po sur 4 po laissent place à 3½ po d'isolant thermique. La nouvelle résistance thermique totale dépendra du type d'isolant thermique; le coût-efficacité dépendra du coût par unité de résistance de l'isolant thermique. Les valeurs R et les coûts par unité de résistance typiques pour quelques types d'isolant figurent au tableau VII.

Le matériau le plus facile à employer serait la fibre de verre qui peut s'insérer à 2 pi centre à centre entre les membres de bois servant de fond de clouage au revêtement de contreplaqué. La fibre de verre s'avère également l'isolant le moins coûteux par unité de résistance. Les panneaux d'isolant rigide devraient être coupés de façon à s'ajuster entre les membres de bois occasionnant plus de travail et de pertes. Si des nattes de fibre de verre à friction sont employées, on peut calculer la contribution à la valeur R du matériau ajouté, de même que la consommation en combustible avec un toit dont le rendement thermique a été amélioré.

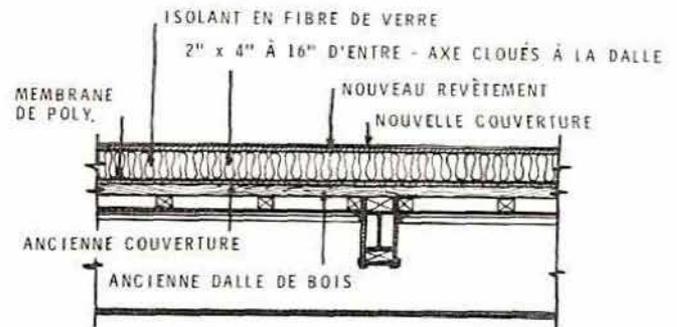


FIGURE 13

Isolant 1½ po	4.50	
Revêtement de contreplaqué	0.47	
Nouveaux bardeaux	0.44	
R ajoutée	<u>5.41</u>	
R _E	5.18	
Total R _N	<u>10.59</u>	
Combustible $\frac{2.069}{R_N}$		0.195 gal/année/pi ²
Isolant 3½ po	10.50	
Revêtement de contreplaqué	0.47	
Nouveaux bardeaux	0.44	
R ajoutée	<u>11.41</u>	
R _E	5.18	
Total R _N	<u>16.59</u>	
Combustible $\frac{2.069}{R_N}$		0.125 gal/année/pi ²

TABLEAU VII
COÛT DE L'ISOLANT

Type d'isolant	R par pouce	Coût/pi ² par unité R	R totale		Coût \$/pi ²	
			1½ po	3½ po	1½ po	3½ po
Polystyrène en grain	3.5	2.3	5.25	12.25	0.12	0.28
Polystyrène extrudé	5	5.2	7.50	17.50	0.39	0.91
Uréthane	5 *	9	7.50	17.50	0.68	1.58
Fibre de verre	3.0	1.3	4.50	10.50	0.06	0.14

* Peut recevoir une classification plus élevée; ce chiffre est pour l'uréthane non couvert d'un papier d'aluminium sur une base à long terme.

Les économies de combustible peuvent maintenant être calculées dans chaque cas en soustrayant la consommation en combustible des toits améliorés de la consommation en combustible du toit existant. Ainsi, $0.399 - 0.195 = 0.204$ gallon par année par pied carré pour un isolant de $1\frac{1}{2}$ po et $0.399 - 0.125 = 0.274$ gallon par année par pied carré pour un isolant de $3\frac{1}{2}$ po. Les économies de combustible pour le toit de 9000 pi^2 seraient de 1836 gallons et de 2466 gallons respectivement, au prix d'environ 60¢ le gallon, représentant \$1102 pour l'isolant de $1\frac{1}{2}$ po et \$1480 par année pour l'isolant de $3\frac{1}{2}$ po. Sur une période de 10 ans, des économies de \$11 020 et de \$14 800 respectivement seront réalisées. Bien entendu, on ne tient pas compte du coût du travail, du coût de l'emprunt, de la montée du prix du combustible, ou si le remboursement de l'emprunt est avantageux ou s'il est préférable de rembourser l'investissement avec les économies réalisées. On peut tenir compte de ces facteurs, mais d'autres connaissances sont nécessaires.

Résistance thermique optimale

Une autre approche à l'amélioration du rendement thermique est de déterminer la quantité optimale d'isolation thermique. Ceci est un peu plus difficile. La quantité optimale d'isolant est la quantité à laquelle les bénéfices retirés en ajoutant de l'isolant, équivalent seulement au coût pour l'ajouter (fig. 14). En supposant qu'il soit possible d'ajouter de l'isolant sans effectuer de changements structuraux, le coût de l'isolant augmente avec l'épaisseur ajoutée. Ainsi, la quantité de chaleur nécessaire (donc le coût) diminue avec l'isolant ajouté. Le coût annuel total des pertes de chaleur d'un bâtiment par le toit est composé du prix amorti de l'isolant ajouté aux prix du combustible. Ce coût baisse à un minimum et augmente par la suite à mesure qu'on ajoute de l'isolant. Le point bas sur la courbe du coût total représente l'épaisseur optimale. La formule pour la résistance optimale est:

$$R (\text{opt}) = \sqrt{\frac{24 \times \text{degrés-jours} \times \text{coût de la chaleur (cents/Btu)} \times P}{\text{Coût de l'isolant} \times \text{efficacité de l'usage du combustible}}}$$

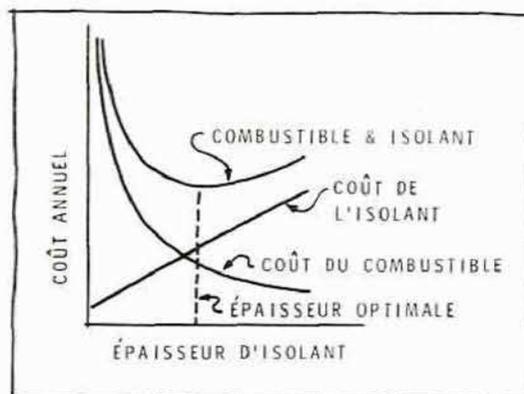


FIGURE 14

Cette formule présente certains facteurs dont on ne se servait pas dans les calculs décrits précédemment. Le coût de la chaleur en cents par Btu peut être obtenu en multipliant le coût par Btu (voir tableau II) par le coût par unité de combustible. Pour le mazout de catégorie n° 2 à 60¢/gallon, le coût est $0.0000059 \times 60 = 0.00035$ cents par Btu. Le coût de l'isolant dans cette formule est le coût par pied carré par unité de résistance et apparaît au tableau VII pour certains types.

P dans la formule représente le facteur de la valeur actuelle. Lorsqu'on achète une pièce d'équipement ou on fait une amélioration dans un bâtiment, il est nécessaire de comparer l'investissement initial avec l'économie produite sur la durée prévue du bâtiment. Si la durée de vie utile prévue est dix années sur un investissement de \$1000, et l'économie réalisée est \$100 par année, tout porte à croire que l'économie réalisée à la fin de l'année paye l'investissement. De fait, à un taux d'intérêt de 10 pour cent, les \$100 par année ne payeraient seulement l'intérêt. On doit connaître le montant d'argent à investir justifiable maintenant pour tirer profit de \$100 par année sur une période de 10 ans. A un taux d'intérêt de 10 pour cent,

ce montant serait de \$614.45, la valeur actuelle d'une série de 10 paiements annuels de \$100 nécessaires pour payer l'intérêt et rembourser les \$614.45 empruntés. Le facteur de valeur actuelle est $\frac{614.45}{100}$ ou 6.1445. Les valeurs P peuvent être déterminées en rapport avec le taux d'intérêt et l'échéance du terme et peuvent être trouvées dans les tableaux financiers de la valeur actuelle d'une rente de 1 à intérêt composé.

La formule est

$$P = \frac{1 - (1 + i)^{-N}}{i}$$

où i = le taux d'intérêt

et N = l'échéance du terme

Mais ce n'est pas tout. Du point de vue de l'économie de combustible, le prix du combustible monte et, à mesure qu'il grimpe, les économies obtenues en ajoutant plus d'isolant augmentent aussi. On peut en tenir compte en se servant d'un taux d'intérêt efficace qui tienne compte du pourcentage d'augmentation des prix du combustible au lieu du taux d'intérêt nominal. La formule est

$$Y = \frac{i - x}{1 + x}$$

où i = le taux d'intérêt

et x = le taux d'augmentation du prix du combustible.

Exemple:

Considérons un bâtiment chauffé au mazout, à Montréal, ayant une dalle qui sera isolée à la fibre de verre ou au polystyrène extrudé. Supposons que le taux d'intérêt soit de 10 pour cent et que le coût du combustible augmente de 12 pour cent par année. Le taux d'intérêt efficace est -1.79 (tableau VIII) et la valeur de P pour une durée prévue de 30 années est environ 40 (tableau IX). Les degrés-jours F sous 65°F pour Montréal totalisent 8200. Le coût par pied carré de la fibre de verre par unité de résistance est 1.3; pour le polystyrène extrudé, le coût est 5.2. On suppose une efficacité de 75 pour cent.

$$R(\text{opt}) = \sqrt{\frac{24 \times 8200 \times 0.000354 \times 40}{1.3 \times 0.75}}$$

$$= \sqrt{\frac{2787}{0.975}}$$

= 53.5 pour la fibre de verre

L'épaisseur d'isolant sera donc $\frac{53.5}{3} =$

17.8 po. Évidemment, on ne peut pas placer cette épaisseur d'isolant par-dessus la dalle d'un toit classique.

Si on préfère le polystyrène, la seule donnée de la formule qui changera est la coût par pied carré par unité de résistance. Ainsi:

$$R(\text{opt}) = \sqrt{\frac{2787}{5.2 \times 0.75}} = 26.73$$

TABLEAU VIII
TAUX D'INTÉRÊT EFFICACE

Augmentation du coût du combustible, % par année	TAUX D'INTÉRÊT %										
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
15	-4.35	-3.48	-2.61	-1.74	-0.87	0	0.87	1.74	2.61	3.48	4.35
14	-3.51	-2.63	-1.75	-0.88	0	0.88	1.75	2.63	3.51	4.39	5.26
13	-2.65	-1.77	-0.88	0	0.88	1.77	2.65	3.54	4.42	5.31	6.19
12	-1.79	-0.89	0	0.89	1.79	2.68	3.57	4.46	5.36	6.25	7.14
11	-0.90	0	0.90	1.80	2.70	3.60	4.50	5.41	6.31	7.21	8.11
10	0	0.91	1.82	2.73	3.64	4.55	5.45	6.36	7.27	8.18	9.09

TABLEAU IX
FACTEURS DE VALEUR ACTUELLE

Année	INTÉRÊT EFFICACE										
	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	5%	10%
5	5.7	5.5	5.3	5.2	5.0	4.9	4.7	4.6	4.5	4.3	3.8
10	12.6	11.9	11.2	10.6	10.0	9.5	9.0	8.5	8.1	7.7	6.1
15	21.1	19.3	17.7	16.3	15.0	13.9	12.8	11.9	11.1	10.4	7.6
20	31.6	28.0	24.9	22.2	20.0	18.0	16.4	14.9	13.6	12.5	8.5
25	44.4	38.1	32.9	28.6	25.0	22.0	19.5	17.4	15.6	14.1	9.1
30	60.1	49.8	41.7	35.2	30.0	25.8	22.4	19.6	17.3	15.4	9.4

TABLEAU X
PÉRIODE DE REMBOURSEMENT D'UN INVESTISSEMENT DANS
L'AMÉLIORATION DU RENDEMENT THERMIQUE EN ANNÉES

Rapport [Économies annuelles] Investissement	INTÉRÊT EFFICACE									
	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	10%	
0.01	45.5	54.5	69.0	100.0						
0.02	30.1	34.3	40.0	50.0	69.7					
0.03	22.8	25.3	28.6	33.3	40.7	55.5				
0.04	18.4	20.1	22.2	25.0	28.9	35.0	46.9			
0.05	15.4	16.7	18.1	20.0	22.4	25.8	31.0	41.0		
0.06	13.3	14.2	15.3	16.7	18.3	20.5	23.4	28.0		
0.07	11.7	12.4	13.3	14.3	15.5	17.0	18.9	21.6		
0.08	10.5	11.0	11.7	12.5	13.4	14.5	15.9	17.7		
0.09	9.4	9.9	10.5	11.1	11.8	12.7	13.7	15.0		
0.10	8.6	9.0	9.5	10.0	10.6	11.3	12.1	13.0		
0.11	7.9	8.3	8.7	9.1	9.6	10.1	10.8	11.5	25.2	
0.12	7.3	7.6	8.0	8.3	8.7	9.2	9.7	10.3	18.8	
0.13	6.8	7.1	7.4	7.7	8.0	8.4	8.9	9.4	15.4	
0.14	6.4	6.6	6.9	7.1	7.4	7.8	8.2	8.6	13.1	
0.15	6.0	6.2	6.4	6.7	6.9	7.2	7.6	7.9	11.5	
0.16	5.6	5.8	6.0	6.3	6.5	6.7	7.0	7.3	10.3	
0.17	5.3	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3	6.6	6.8	9.3	
0.18	5.1	5.2	5.4	5.6	5.7	5.9	6.2	6.4	8.5	
0.19	4.8	5.0	5.1	5.3	5.4	5.6	5.8	6.0	7.8	
0.20	4.6	4.7	4.9	5.0	5.2	5.3	5.5	5.7	7.3	
0.21	4.4	4.5	4.6	4.8	4.9	5.1	5.2	5.4	6.8	
0.22	4.2	4.3	4.4	4.5	4.7	4.8	5.0	5.1	6.4	
0.23	4.0	4.1	4.2	4.3	4.5	4.6	4.7	4.9	6.0	
0.24	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	5.7	
0.25	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	5.4	

L'épaisseur de l'isolant sera de $\frac{26.73}{5} = 5.34$ po. On pourrait placer cette quantité d'isolant dans un toit classique, mais il devrait être en une épaisseur, car des couches successives d'isolant de polystyrène n'adhèrent pas facilement l'une à l'autre.

Il existe aussi une formule pour déterminer la période de remboursement pour tout investissement servant à améliorer le rendement thermique afin d'économiser de l'énergie calorifique. L'économie annuelle d'énergie convertie en dollars, l'intérêt efficace et le coût de l'amélioration de la construction sont nécessaires pour cette formule. La formule est:

$$N = \frac{\text{Ln} \left(\frac{R}{R - Y} \right)}{\text{Ln} (1 + Y)}$$

où N = la période de remboursement

R = le rapport des économies prévues avec l'investissement nécessaire

Y = le taux d'intérêt efficace et,

Ln = le logarithme naturel

Le tableau X donne les périodes de remboursement d'après cette formule mises en rapport avec l'intérêt efficace et les économies annuelles avec le rapport de l'investissement.

L'exemple de l'église peut être maintenant analysé un peu plus profondément, supposant que le coût de l'installation du toit soit de \$10 000; le prix des bardeaux d'asphalte, qui devraient être remplacés de toute façon, peut être négligé. Le rapport des épargnes par année avec l'investissement total requis pour les $3\frac{1}{2}$ po d'isolant serait $\frac{1480}{10\ 000} = 0.15$. En calculant un intérêt de 10 pour cent sur l'argent et une augmentation du prix du combustible de 12 pour cent, l'intérêt efficace est -1.79. La période de remboursement serait d'environ 6.3 années (tableau X).

Si on se servait d'un polystyrène extrudé, le coût de ce type d'isolant serait d'environ \$7000 augmentant le coût total à près de \$17 000. La résistance totale serait d'environ 23.59 produisant une économie de 2799 gallons de mazout ou \$1679 annuellement. Le rapport des économies annuelles avec le coût total est 0.098. Au même intérêt efficace il faudrait 9.3 années avant d'arriver à la période de remboursement (tableau X).

Effets d'une augmentation d'épaisseur de l'isolation thermique

L'épaisseur optimale d'isolant pour les toits est substantiellement plus élevée que l'épaisseur généralement installée. Il reste encore à savoir si ceci diminuera la durée en service de la couverture. Lorsque l'isolant est installé directement sous la membrane de couverture, ce qui est une pratique courante pour les systèmes de toiture classiques, on a suggéré qu'il y aurait un vieillissement accéléré, que la résistance à l'impact et la stabilité structurale seraient réduites et que le risque de rupture augmenterait. Tous ces risques, sauf la résistance à l'impact, sont étroitement liés à la plus grande gamme de température auquel la membrane sera soumise en comparaison avec un toit abondamment isolé.

La différence principale de la gamme de température résultera des effets du rayonnement le jour et la nuit; ce qui veut dire une température un peu plus chaude pour le toit abondamment isolé par temps ensoleillé le jour et un peu plus froide par une nuit claire et fraîche. La vitesse de dégradation chimique du matériau accélère à mesure que la température monte, de telle façon que toute augmentation de la température sur les températures estivales normalement chaudes peut augmenter la dégradation des matériaux comme le bitume.

En plus d'une quelconque augmentation de température suite à une augmentation de la résistance de l'isolant, la membrane est située plus loin de la dalle structurale. L'importance de la résistance de l'isolant au mouvement latéral de la membrane prend certainement plus d'ampleur. On suggère aussi qu'il y aurait une augmentation de la contraction différentielle de la membrane causée par certains endroits couverts de neige et d'autres à nu. De fait, l'augmentation d'isolant réduit cet effet.

Des calculs effectués par la Division des recherches sur le bâtiment, le "National Bureau of Standards" à Washington et plusieurs consultants aux États-Unis soutiennent tous que les craintes exprimées au sujet de l'état des membranes de couverture, suite à une augmentation de l'épaisseur d'isolant thermique, ne sont pas justifiées. L'augmentation de la température de la membrane des toits abondamment isolés en comparaison avec des toits légèrement isolés est secondaire et personne ne suggère d'éviter d'isoler pour augmenter la durée en service de la membrane. Le rapport du NBS indique que la différence entre la température élevée de la

membrane en été pour un système de toit multicouches de surface noire sans isolant thermique et un autre toit avec $\frac{1}{2}$ po d'isolant, est plus grande que la différence dans un système allant de $\frac{1}{2}$ po à 5 po d'isolant. Même en décuplant 1 po d'isolant, l'augmentation de la température de la membrane n'excéderait probablement pas 5°F. Il faut remarquer également que la couleur du toit a un effet significativement plus prononcé sur la température de la membrane. Pour des toits d'une même épaisseur d'isolant on a trouvé une différence de température de près de 30°F (17°C) entre une surface noire et une surface blanche. Donc, on peut dire d'après la température, que l'épaisseur d'isolant thermique ne joue qu'un rôle mineur dans la dégradation chimique d'une couverture multicouches en comparaison de la couleur de la surface.

La résistance de la membrane au mouvement, dans un système où la membrane est posée par-dessus l'isolant, est transmise à la dalle structurale à travers l'isolant thermique. L'adhérence de la membrane à l'isolant, la résistance au cisaillement de l'isolant et l'adhérence de l'isolant à la dalle participent tous à cette transmission. Plus d'une couche d'isolant peut être nécessaire pour obtenir l'épaisseur voulue. Dans ce cas, pour assurer une résistance adéquate au mouvement, il faudra probablement fixer l'isolant à l'aide d'attaches mécaniques. On réduit le mouvement de la membrane en recouvrant la membrane de gravier blanc ou d'une autre couche de matériaux réfléchissants qui abaisse la température de la surface. La résistance du toit à l'impact dépend du raccourcissement par compression sous une charge qui sera plus grande à mesure que l'épaisseur de l'isolant augmente. Tout porte à croire que la membrane est plus vulnérable aux dommages causés par des objets qui tomberaient pendant la construction, par la circulation sur le toit et par la grêle dans certaines régions géographiques.

Méthodes d'amélioration du rendement thermique

Comment améliorer l'isolation thermique pour combattre la crise de l'énergie? Pour les besoins de cette discussion, nous divisons en trois catégories les systèmes de toiture: l'entretoit ou l'attique ventilé, le toit classique à membrane double et le toit plat à étanchéité multicouches protégée.

Le système à entretoit ou attique ventilé était d'usage courant dans les bâtiments commerciaux au Canada il y a cinquante ans, et on le retrouve encore fréquemment dans certaines

parties de l'Europe (fig. 15). Le système consiste en une dalle secondaire habituellement en bois, au-dessus de la dalle structurale principale, qui supporte la membrane de couverture. Lorsqu'on se sert d'isolant avec ce système, on le place au-dessus de la dalle structurale principale; lorsqu'on constata qu'il était nécessaire de contrôler la vapeur d'eau dans l'air, on place une membrane sur la dalle sous l'isolant thermique. Ce système s'avéra très efficace. La tolérance aux fuites d'air est bonne car le coupe-vapeur retarde l'écoulement de l'humidité de l'intérieur du bâtiment. Les petites quantités pénétrant par les imperfections dans l'attique ou l'entretoit, se mélangent à un grand volume d'air et peuvent par la suite s'écouler sans danger vers l'extérieur si l'entretoit est ventilé. Vraisemblablement, les problèmes de membrane sont moins fréquents car la couverture se trouve attachée directement à la dalle secondaire. La membrane de couverture est soumise à de grandes différences de températures, mais moindres que lorsqu'elle est placée par-dessus l'isolant. De plus la dalle et la membrane subissent approximativement la même gamme de température, réduisant le risque de mouvement différentiel et de rupture.

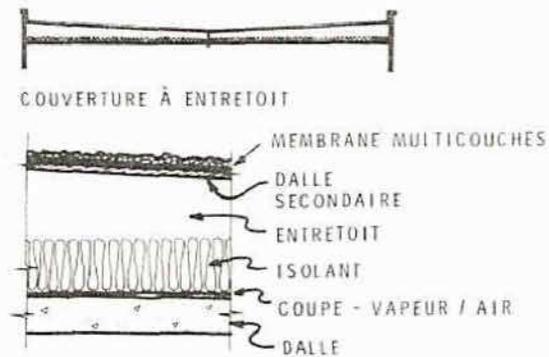


FIGURE 15

La structure de bois et la dalle secondaire ne jouissent plus de l'assentiment des codes du bâtiment, bien que le risque de feu ne semble pas élevé. L'amélioration de l'isolation thermique de tels bâtiments au point de vue de l'économie d'énergie est relativement facile. Pour les bâtiments existants on ajoute simplement des épaisseurs supplémentaires de l'isolant le moins coûteux qui satisfait à toutes les exigences nécessaires telles que la résistance au feu et à la décomposition. Dans les nouveaux bâtiments on peut prévoir l'épaisseur optimale sans s'inquiéter de l'adhérence et de la

résistance au cisaillement de l'isolant thermique. Le principe du système est tellement sûr qu'on espère que quelqu'un puisse concevoir une super-structure et une dalle secondaire qui suivraient les exigences du Code de prévention des incendies. La plupart des toits résidentiels au Canada appartiennent encore fondamentalement à ce type de toit qui donne un excellent rendement lorsqu'il est muni d'un bon coupe-vapeur et que la ventilation de l'entre-toit est adéquate.

Le toit classique à membrane double moins efficace lorsqu'il est plat, est le système en usage dans la plupart des bâtiments commerciaux et industriels aujourd'hui (fig. 16). La membrane coupe-vapeur est en partie ou complètement collée, ou attachée autrement, à la dalle structurale. L'isolant est collé sur cette membrane et la membrane de couverture principale est posée par-dessus l'isolant qu'on veut habituellement coller complètement. Le système peut être efficace seulement s'il n'y a pas d'humidité ou d'air emprisonnés entre les deux membranes, au moment de l'installation ou pendant la tenue en service, et que le système résiste adéquatement aux forces de cisaillement de façon à ce que la résistance au mouvement de la membrane soit fournie par la dalle jusqu'à la membrane, par l'entremise de l'isolant qui les sépare. On peut féliciter les entrepreneurs en couverture d'avoir construit autant de toits efficaces de ce type, même dans la version "toit-plat". La DRB a suggéré des moyens d'améliorer l'efficacité du système, c'est-à-dire en évacuant les eaux pluviales et en ventilant. Maintenant, comment améliorer l'isolation thermique de ces systèmes?

A mesure que l'isolant est ajouté entre le coupe-vapeur sur la dalle et la membrane principale, la distance entre la membrane et la dalle devient plus grande et l'adhésion entre ces couches pour le transfert de la force de cisaillement devient plus forte. Il y a plus de morceaux de matériaux, plus de joints et plus d'air et d'humidité qui peuvent être emprisonnés. L'on croirait que l'isolant pourrait être posé en une simple épaisseur, mais le risque de gauchissement du panneau de l'épaisseur voulue devient plus grand lorsqu'on pose plusieurs lits homogènes d'isolants et on ne sait pas très bien ce qui se produirait aux joints de tels systèmes. Il semble que la limite d'épaisseur simple d'isolant ne devrait pas excéder 3 à 4 po. Dans certains cas, il peut être possible d'ajouter l'isolant à l'intérieur, et on pourrait considérer l'application d'un isolant de type giclé, qui par capillarité amène l'humidité à la surface et respire, tel que l'amiante ou la fibre

cellulosique (fig. 17). La dalle et le coupe-vapeur doivent demeurer, bien entendu, à une température au-dessus du point de rosée et, en règle générale, l'isolant intérieur ne devrait pas constituer plus d'un tiers de la résistance totale.

Le troisième type de système de toiture, le toit plat à étanchéité multicouches protégée (fig. 18), jouit d'un essor considérable au Canada et en Europe et jusqu'à un certain point aux États-Unis. Dans ce système, on élimine la membrane supérieure, la membrane principale et le coupe-vapeur sont jumelés sur la dalle structurale et l'isolant est exposé partiellement ou complètement aux conditions météorologiques.

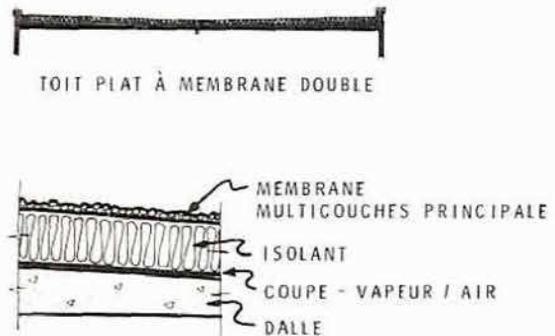


FIGURE 16

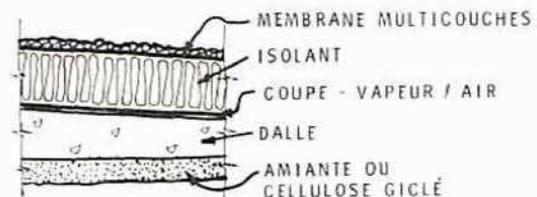


FIGURE 17

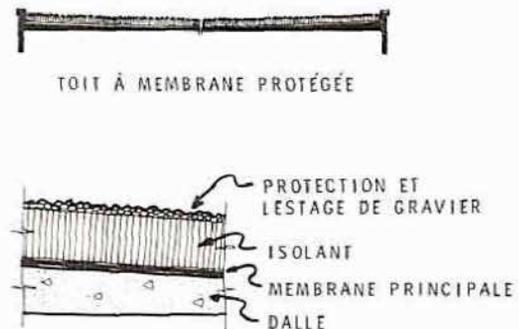


FIGURE 18

Ce système, ou l'une de ses variantes, semble offrir le plus de possibilités d'amélioration de l'isolation, à l'aide d'isolant en panneaux, sur des toits nouveaux ou existants. La seule matière isolante convenant actuellement à ce système est un polystyrène du type extrudé, mais il se détériore sous l'effet des rayons ultraviolets. Il est donc assez difficile de bien coller ce matériau à cause de sa sensibilité aux solvants et à la chaleur et, employé sur des toits sur lesquels l'eau peut s'accumuler à cause d'une pente insuffisante ou de la présence d'avaloirs de toit à chicanes (entrées d'eau pluviale à débit contrôlé), l'isolant flottera aisément. Si la membrane employée est d'un type non durcissant comme le bitume caoutchouté, une feuille de séparation doit être utilisée pour empêcher l'adhérence des deux matériaux. Ces facteurs nécessitent l'usage d'un revêtement protecteur et de lestage; une lourde couche de gravier est habituellement employée à ces fins. L'augmentation de l'épaisseur d'isolant augmente la flottabilité, et conséquemment le poids du gravier doit être augmenté. Si, toutefois la pente du toit et l'évacuation de l'eau pluviale sont adéquates et l'isolant colle à la membrane, la flottaison ne posera pas de problème. Alors, on peut employer une quantité modérée de gravier pour protéger la membrane contre les rayons ultraviolets et assurer qu'il n'y aura pas de soulèvement de la membrane lors d'inondations accidentelles sur la couverture.

Une approche possible pour réduire la force de soulèvement, et conséquemment le poids du gravier, est de poser une partie de l'isolant par-dessus et l'autre partie par-dessous la membrane (fig. 19) L'isolant placé au-dessus de la membrane la protégera du climat et de la circulation sur le toit; d'autre part, l'isolant placé en-dessous refroidira la membrane. Deux facteurs entrent en ligne de compte: l'évacuation de l'eau sur la membrane qui peut se faire seulement si la température de la membrane est au-dessus du point de congélation et la condensation sous la membrane, qui se produira lorsque sa température se situe sous le point de rosée de l'air intérieur. En règle générale, si la résistance thermique de l'isolant sous la membrane est maintenue à environ un tiers du total, il ne devrait pas y avoir de problèmes. Le type d'isolant employé sous la membrane devrait avoir une bonne adhérence.

Ceci est la situation rencontrée lorsqu'on améliore l'isolation thermique d'un toit existant si le système en place est en bon état. Dans ce cas, il serait souhaitable d'enlever le gravier en place, d'appliquer une nouvelle

couche de bitume et, dans certains cas, des feutres additionnels, et ensuite d'installer un isolant de polystyrène extrudé et une couche de gravier servant de lestage et de protection tel que mentionné précédemment. Les restrictions de structure et la facilité d'exécution devraient être prises en considération. Une quantité d'isolant ayant une résistance deux fois plus grande que la résistance de l'isolant déjà en place devrait être utilisée. On doit tenir compte de l'effet de l'isolation sur les solins, les tasseaux biseautés et les avaloirs en considérant la facilité d'exécution.

Le coût-efficacité de l'amélioration de l'isolation

Une autre question très importante lorsque l'on considère un bâtiment comme un tout est de savoir où l'on peut tirer le plus de bénéfice avec l'argent dépensé par rapport à l'économie d'énergie. Certains indices démontrent que pour plusieurs types de bâtiment, on devrait examiner plusieurs endroits avant le toit, à moins que la couverture ne doive être remplacée, dans lequel cas évidemment il faut améliorer l'isolation.

Il a été démontré que des modifications à l'équipement et aux méthodes d'exploitation, aux fenêtres et aux portes, et une augmentation de l'étanchéité à l'air en général peuvent permettre de réaliser des économies assez grandes pour plusieurs bâtiments, et sans aucun doute ces endroits devraient avoir la priorité. Seulement après pourra-t-on songer à améliorer l'isolation des murs et des toits.

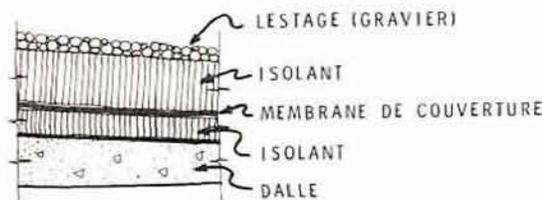


FIGURE 19