Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 107 (1981)
Heft: 10: SIA, no 3, 1981

Artikel: Optimalisation thermique des bâtiments - Iglou
Autor: Lanz, Jürg / Schopfer, Adolf
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74325

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

TABLEAU 3: *Répartition en % des pertes de disponibilité depuis la mise en fonctionnement jusqu'au 31 décembre 1980*

		KKB I	KKB II
Facteur de charge		73,1%	84,1%
Pertes de charge		26,9%	15,9%
Pertes dues à une panne	Système primaire, générateur de vapeur exclu	3,9%	0,4%
	Examen et réparations du générateur de vapeur	4,2%	1,4%
	Installation secondaire	1,1%	0,9%
	Divers	0,1%	0 %
Pertes dues à des arrêts planifiés	Divers, y compris service de piquet et essais	2,7%	2,0%
	Restrictions de la part des autorités	3,9%	1,3%
	Prolongation de l'utilisation du combustible (costdown)	0,1%	0,1%
	Rechargement de combustible et révision annuelle (y compris révision et réparations du générateur de vapeur)	11,0% (2,8%)	9,9% (2,5%)

4. Personnel d'exploitation

Le nombre de places de travail prévues a été peu à peu augmenté, surtout parmi le personnel d'entretien et parmi les ingénieurs; aujourd'hui, on s'approche de 300 personnes. En effet, d'une part l'adaptation constante aux progrès techniques multiplie les modifications; d'autre part, le nombre de personnes venant de l'extérieur pour les révisions ne doit pas dépasser un certain seuil par rapport au personnel de la centrale chargé de l'entretien et de la surveillance.
Aujourd'hui, lors des révisions de la centrale de Beznau, 250 semble la limite supérieure raisonnable du nombre de personnes venant de l'extérieur un même jour.

5. Remarques générales

Le bilan de 12 ans et 10 ans (Beznau I et II) d'expérience d'exploitation permet de souligner les quelques points suivants:

— Le but initial, fixé de 6500 à 7000 heures d'exploitation à pleine puissance par année, a été dépassé dans les deux centrales pendant les 6 dernières années.
— Les difficultés rencontrées dans les générateurs de vapeur, qui ont provoqué des arrêts de production à Beznau I en 1971, 1972 et 1973, ont pu être éliminées grâce aux études et aux essais menés à chef en grande partie par les spécialistes mêmes de l'exploitation.
— L'énergie électrique a toujours été produite en respectant les limites imposées par la loi et les critères techniques de sécurité. La radioactivité dégagée dans les environs a été minime et n'atteint que quelques pourcent des valeurs pourtant sévères fixées par la loi.
— Dans cette expérience de 20 années-réacteur, il n'y a eu aucun incident important du point de vue de la sécurité des installations et aucune personne n'a été irradiée au-delà des prescriptions légales.

Si l'on se base sur l'expérience acquise, on ne doit s'attendre à aucune perte importante de production, ni à un arrêt prolongé; il devrait être possible de conserver un facteur de charge de plus de 80% dans les prochaines années.
La tendance actuelle de prescrire toujours plus de contrôles administratifs et d'inspections et d'exiger des mesures pour l'amélioration de la sécurité va entraver à l'avenir la disponibilité des installations.

Adresse des auteurs:
Peter Froelich, ing. dipl. EPFZ
Kurt Küffer, ing. dipl. EPFZ
Nordostschweizerische Kraftwerke AG
5400 Baden

Optimalisation thermique des bâtiments — *Iglou* [1]

par Jürg Lanz et Adolf Schopfer

1. Introduction

Un bâtiment constitue un système de réglage thermique complexe, influencé par sa propre structure, ses installations de service, les sollicitations climatiques et les exigences posées par son utilisation (fig. 1).
Afin de prévoir le comportement thermique de ce système, il n'existe que l'expérimentation, le calcul sur la base d'hypothèses simplificatrices ou selon des modèles mathématiques plus ou moins complexes.
Pour le calcul proprement dit du système de réglage, deux genres de méthodes se trouvent au premier plan:

— les méthodes stationnaires (valeur K)
— les calculs transitoires *Iglou-G.*

Par rapport aux méthodes stationnaires, les calculs transitoires permettent de tenir compte de l'aptitude d'accumulation de chaleur d'un bâtiment, de son comportement d'absorption, de l'influence dans le temps du rayonnement solaire par les fenêtres, des conditions d'ombre en fonction du temps, des évolutions des températures intérieures ainsi que de l'inertie du système de chauffage.
L'optimalisation thermique d'un bâtiment concerne deux faits bien distincts:
Premièrement, il s'agit d'amener le système de réglage d'un bâtiment à un état d'équilibre. Cela signifie que l'implantation du bâtiment en question, sa conception architecturale, son système de chauffage et les exigences des utilisateurs doivent être mutuellement adaptés de façon optimale. La conception interdisciplinaire et globale est donc une condition essentielle. Deuxièmement, l'optimalisation du système dans son ensemble implique l'accès à un niveau énergétique optimal pour celui-ci. Dans cet objectif d'optimalisation, divers critères peuvent avoir, de cas en cas, plus ou moins d'importance.
Par exemple:

— Normes, prescriptions: sous son aspect général, une prescription constitue déjà le résultat d'une optimalisation au niveau de l'économie nationale.
— Rentabilité économique: la somme des coûts d'investissement et des coûts de l'énergie devrait tendre, pour une période donnée, vers une valeur minimale.

Fig. 1. — Système de réglage thermique d'un bâtiment.

[1] *Iglou* = Integrierte Gesamtenergielösung Optimiert und Umweltgerecht = Solution énergétique globale, optimalisée et faisant la part de l'environnement.

— Critère d'utilisation: il s'agit de satisfaire à certains critères de confort, qui peuvent devenir déterminants, en particulier pour la planification des conditions estivales.
— Critères idéologiques: on recherche par exemple un approvisionnement en chaleur d'un bâtiment aussi autarcique que possible.
— Critères purement énergétiques: on demande par exemple que la somme des énergies primaires investies dans les matériaux de construction et de l'énergie de chauffage au cours d'une période donnée soit minimale.
— Critères techniques: le confort exigé, par exemple, devrait être obtenu au moyen des installations techniques disponibles.

En général, l'optimalisation économique se situe au premier plan. Un paramètre important pour l'analyse de la rentabilité économique est donné pour la consommation d'énergie pendant la période de chauffage. Au chapitre 4, un modèle permettant de déterminer par des calculs transitoires la consommation annuelle d'énergie est expliqué. Finalement, le chapitre 5 présente une méthode d'optimalisation économique de l'enveloppe du bâtiment.

2. Bases météorologiques des analyses thermiques

Les calculs transitoires pour la détermination de la température ambiante et des puissances de chauffage requises exigent la connaissance des évolutions diurnes des influences météorologiques, telles que la température extérieure, l'intensité du rayonnement solaire, etc. En Suisse, on ne dispose que depuis peu de temps et pour un nombre restreint de localités de mesures horaires des données climatiques. L'analyse montre que les valeurs moyennes journalières et les variations journalières de la température de l'air sont plus fortement influencées par la situation météorologique que par la situation géographique du lieu. Sur la base de nos propres recherches, nous avons développé un procédé qui, pour une situation météorologique particulière ainsi qu'une implantation géographique et une altitude données, permet la détermination d'une évolution typique de la température de l'air pour un jour choisi. Lors de la prise en compte de la situation météorologique, on distingue pour les conditions estivales entre des jours extrêmement chauds, chauds, normaux et frais, et pour les conditions hivernales entre des jours extrêmement froids, froids, normaux et doux. Pour la situation géographique, on fait une distinction entre le côté nord et le côté sud des Alpes. La fonction presque linéaire liant l'altitude au-dessus de la mer et les valeurs diurnes moyennes de la température de l'air permet de définir les conditions de température d'un lieu donné sur la base de son altitude. Cette dépendance des températures diurnes moyennes des conditions météorologiques et de l'altitude, représentée sur la fig. 2, fournit les bases pour la prévision des évolutions de la température diurne pour des endroits quelconques du côté nord des Alpes. Les conditions de nébulosité exercent une influence prépondérante sur l'évolution des températures atmosphériques au cours de la journée. Les variations journalières de la température de l'air dépendent d'une part des conditions de nébulosité, d'autre part de la température diurne moyenne (saison), comme on peut le voir sur la fig. 3.

Fig. 2. — Diminution de la température en fonction de l'atmosphère standard en janvier et juillet pour différentes conditions météorologiques (nord des Alpes).

Fig. 3. — Relation entre variations de température diurne et température journalière moyenne (saison).

Ce procédé permet de simuler avec une précision suffisante les évolutions de température de l'air de localités situées jusqu'à une altitude d'env. 2000 m. La fig. 4 montre les variations de température d'un jour chaud normalisé du mois de juillet et permet une comparaison avec les évolutions statistiques des températures de 4 stations de mesure au nord des Alpes. Toutes les évolutions journalières sont représentées sous forme de divergence avec les valeurs moyennes des températures.

La température du sol, dont on a besoin pour déterminer les flux thermiques des parois des caves, etc., ne présente de variations journalières que dans les couches à proximité immédiate de la surface. Les valeurs moyennes mensuelles mesurées et exploitées statistiquement en fonction de l'altitude du lieu peuvent être considérées comme constantes pour une journée donnée.

3. Programme de calcul *Iglou-G*

3.1 *Description du programme*

Le programme d'ordinateur décrit ci-après a été élaboré et mis au point chez Motor-Columbus Ingénieurs-Conseils SA et constitue un important instrument de travail pour les analyses thermiques. Ce logiciel se base sur le procédé de calcul de W. Heindl, F. Haferland et H. Fuchs [1][2].

Le procédé suppose des phénomènes périodiques, par ex. des phénomènes thermiques qui se répètent journellement selon le même cycle. Le calcul consiste en une analyse de Fourier des fluctuations journalières des paramètres extérieurs et intérieurs du bâtiment spécifiés, ainsi que des températures ou des flux de chaleur qui en résultent.

Fig. 4. — Evolution de la température journalière en juillet aux stations météorologiques du nord des Alpes, en fonction de l'évolution journalière normalisée.

Le logiciel permet de calculer les températures ambiantes des locaux et des éléments du bâtiment, ainsi que les puissances de chauffage ou de refroidissement requises pour des bâtiments entiers ou diverses parties de ceux-ci. Ce faisant, il y a lieu de tenir compte de toutes les influences extérieures et intérieures significatives, y compris les interférences thermiques à l'intérieur d'un bâtiment donné. On tient compte en particulier — en plus des influences climatiques extérieures telles que température de l'air, intensité du rayonnement solaire compte tenu des effets d'ombre, températures de l'environnement et vents — des influences réciproques se produisant à l'intérieur même du bâtiment. En font partie, en plus de la puissance thermique de l'installation de chauffage proprement dite, celle des occupants, de l'éclairage et des machines. On considère également les échanges de chaleur entre les différents locaux d'un bâtiment par suite de la conduction thermique des parois et des plafonds, ainsi que celui provoqué par les échanges d'air. Dans le calcul, on introduit l'efficacité des mesures de protection contre le rayonnement solaire (effet d'ombre) et de l'incidence de ce dernier par les fenêtres (échauffement des structures internes du bâtiment).

Les calculs effectués à l'aide de ce programme d'ordinateur fournissent une base d'appréciation du comportement thermique de différentes variantes de construction, pour chaque étape de planification. Cela est valable tant pour l'optimalisation énergétique du chauffage ou du refroidissement que pour la réalisation de climats ambiants confortables durant toute l'année, avec un minimum d'énergie.

3.2 *Ventilation et aération*

Tandis que la ventilation mécanique peut être exprimée par le nombre de renouvellements d'air par unité de temps, il est difficile de tenir compte des conditions d'aération naturelles en fonction de la perméabilité à l'air des fenêtres, portes, etc., et des pressions exercées par le vent. Les points suivants décrivent la méthode appliquée dans le code *Iglou-G* pour tenir compte des conditions d'aération:

— En partant de la direction et de la vitesse du vent, ainsi que des formes du bâtiment, on détermine la pression extérieure exercée sur les façades.

— Pour les fenêtres, portes, etc., il y a lieu de spécifier les valeurs de perméabilité des joints et des longueurs de joint, ou des surfaces d'ouverture avec les durées d'ouverture correspondantes. Ce faisant, on peut simuler les habitudes d'aération des habitants d'un immeuble.

— Pour chaque local, on établit le bilan des quantités d'air pulsées et évacuées par suite de la perméabilité des joints et des aérations volontaires, ainsi que celles provenant de la ventilation mécanique.

— Par itération, on calcule pour chaque pièce un état de pression de l'air pour lequel les quantités pulsées et évacuées sont équilibrées.

Ce calcul détermine les pertes et les gains en chaleur de ventilation sur la base des flux d'air et des différences de température à considérer de cas en cas. On peut ainsi apprécier les effets de la ventilation et de l'aération.

3.3 *Effet d'ombre*

La plupart des paramètres qui affectent l'évolution de la température de l'air par suite du rayonnement solaire ne peuvent être influencés lors de l'élaboration du projet; l'effet du rayonnement solaire sur les parois extérieures, en particulier sur les fenêtres, est en revanche fortement tributaire de l'effet d'ombre et devient donc l'objet de la planification. Par l'ombrage, on dispose d'un moyen important pour influencer le confort thermique de l'habitation. Il est utile, pour les parties extérieures des constructions et en particulier pour les fenêtres, de déterminer l'évolution journalière de l'ombre, de telle façon qu'on obtienne d'heure en heure la partie des surfaces se trouvant à l'ombre. La méthode décrite ci-après (fig. 5) illustre la façon dont les évolutions de l'ombre sont déterminées.

— La base des calculs pour la détermination des surfaces ombrées est fournie par l'analyse géométrique du local ainsi que par des intégrations selon la méthode de Monte-Carlo.

— L'algorithme de la solution est basé sur la condition préliminaire que deux surfaces (la surface formant obstacle et portant ombre et la surface éventuellement ombrée) ainsi que le vecteur des rayons solaires soient définis dans un système de coordonnées cartésiennes.

— La surface de l'obstacle et la surface à calculer parcourent l'algorithme de la solution par heures successives, ce qui donne la partie ombrée de la surface en questions.

— Par la projection de la surface formant obstacle sur le plan de l'image, on obtient la superficie de l'ombre. A l'aide d'un générateur de nombres aléatoires pour l'intégration de Monte-Carlo à deux dimensions, on se procure les coordonnées d'un

Fig. 5. — Définitions utilisées lors de la détermination analytique de l'effet d'ombre.

point quelconque à l'intérieur de la surface considérée. A l'aide du contrôle du signe d'un produit vectoriel choisi, on détermine si ce point est situé à l'ombre ou non. La réponse positive ou négative pour un point donné constitue le résultat d'un pas d'intégration. On s'aperçoit qu'après 10 pas d'intégration déjà on obtient une précision de 10% pour le pourcentage de surface ombrée.

4. Calcul du besoin en énergie annuel

4.1 *Généralités*

Les descriptions données ci-après illustrent un procédé permettant d'obtenir et d'optimaliser le besoin d'énergie annuel sur la base de calculs transitoires effectués sur un bâtiment administratif.

4.2 *Mesures de nature thermique*

Les analyses transitoires de journées représentatives montrent qu'il existe une certaine proportionnalité entre les moyennes journalières des puissances de chauffage ou de refroidissement et le besoin énergétique annuel correspondant. Lors de la planification des bâtiments, il est donc possible de déterminer l'efficacité de différentes mesures d'amélioration sur la base de certains jours représentatifs. Dans la fig. 6, on montre de cette façon les différentes mesures envisagées pour le bâtiment administratif en question, avec les réductions correspondantes du besoin en énergie. Ces différentes mesures entraînent des économies d'énergie très diverses, pour lesquelles il s'agirait de considérer en outre les investissements requis. Il y a lieu de mentionner que l'exécution simultanée de plusieurs mesures ne permet pas d'atteindre la somme des différentes réductions de besoin en énergie.

4.3 *Installations de chauffage et de refroidissement*

Pour le dimensionnement de l'installation de chauffage (ou de refroidissement), il est nécessaire de connaître la puissance maximale requise. Pour des températures journalières moyennes quelconques la fig. 7 montre les puissances de chauffage et de refroidissement maximales correspondantes nécessaires pour assurer une ambiance agréable. Ce diagramme permet, en posant les critères de planification, de déterminer les puissances nécessaires, sans devoir tenir compte des rendements thermiques des installations de chauffage ou de refroidissement.

Lors de la planification et de l'optimalisation de l'installation de chauffage, ce diagramme permet également de voir jusqu'à quelle température extérieure une puissance de chauffage donnée (pompe à chaleur) peut suffire, afin de prévoir pour les autres conditions extrêmes une installation complémentaire appropriée (chauffage d'appoint).

Fig. 6. — Influence sur le besoin en énergie annuel de chauffage des mesures prises (bâtiment administratif).

4.4 *Détermination du besoin annuel en énergie*

Lors de la détermination du besoin annuel en énergie, il s'agit de décrire par un minimum de paramètres les conditions climatiques agissant sur un bâtiment. Pour différentes localités, on dispose de statistiques météorologiques donnant les courbes de fréquences cumulées des températures journalières moyennes.

En définissant une température pour l'intérieur d'un local et en tenant compte d'une différence de 6 à 9° C due à la présence de personnes, à l'éclairage, etc., on peut calculer le nombre de degrés-jours du chauffage, resp. du refroidissement, représentés dans la fig. 8 pour le lieu d'implantation du bâtiment administratif considéré. Ces deux valeurs caractéristiques servent à la détermination du besoin annuel en énergie, pour autant qu'on ait effectué les analyses pour un certain nombre de jours choisis.

L'extrapolation à l'année entière du besoin énergétique de certains jours donnés à l'aide de la courbe des fréquences cumulées est cependant rendue difficile par le fait que la part de gain d'énergie (soleil, etc.) et celle de perte (transmission, etc.) dans le bilan global sont dépendantes de la valeur absolue de la température journalière moyenne.

Le principe de superposition, admis dans les calculs stationnaires et permettant d'extrapoler tous les composants indépendamment les uns des autres, n'est que partiellement valable dans notre cas (par exemple: relativement au problème du chauffage). Par l'introduction de facteurs de correction, il est possible dans de nombreux cas d'obtenir une précision suffisante.

Dans le cas de bâtiments complexes, il est souvent important d'analyser pour des jours représentatifs toutes les influences extérieures et intérieures en mode transitoire. Les calculs fournissent les bilans énergétiques de jours sélec-

Fig. 8. — Degrés-jours de chauffage (DJC) et de refroidissement (DJR) (bâtiment administratif).

Fig. 7. — Puissance de chauffage et de refroidissement requise (bâtiment administratif).

Fig. 9. — Diagramme du bilan énergétique — période de chauffage (bâtiment administratif, 3730 djc).

Fig. 10. — Diagramme du bilan énergétique — période de refroidissement (bâtiment administratif, 650 djr).

tionnés et la dépendance des différents composants du bilan de la valeur journalière moyenne de la température de l'air extérieur. Chaque température journalière moyenne correspond à un point donné de la courbe des fréquences cumulées et permet de déterminer les degrés-jours de chauffage qui s'y rapportent. A partir de la somme des degrés-jours connue d'un lieu donné, on peut déterminer des périodes de chauffage fictives de jours sélectionnés avec les valeurs journalières moyennes de l'air extérieur. Sur la base d'un nombre minimal d'analyses de jours sélectionnés, on peut établir un bilan énergétique (fig. 9). Ce diagramme montre les différentes répartitions des pertes (transmission, aération) et des gains d'énergie (soleil, personnes, éclairage), ainsi que la contribution du chauffage en fonction soit de la période de chauffage fictive, soit de la température journalière moyenne de l'air extérieur. En se servant de la courbe des fréquences cumulées (fig. 8), on peut, par une approximation à l'aide d'une courbe à gradins successifs, obtenir les sommes de certains jours sélectionnés, avec des valeurs journalières moyennes données pour la température de l'air extérieur pendant la période de chauffage. A partir des pourcentages d'énergie des différents jours, correspondant aux températures moyennes journalières (période de chauffage fictive), on obtient par sommation le bilan énergétique de la période de chauffage et donc le besoin en énergie annuel.

Le même procédé permet d'établir le diagramme du bilan énergétique du même bâtiment administratif pour les conditions estivales, en partant des degrés-jours de refroidissement du lieu d'implantation (fig. 10).

Par une mise en valeur détaillée des diagrammes du bilan énergétique, on peut élaborer des flux énergétiques clairement compréhensibles pour les conditions estivales et hivernales (fig. 11). Ces diagrammes permettent d'évaluer les propriétés thermiques ainsi que le besoin annuel d'énergie d'un bâtiment.

5. Optimalisation économique de l'enveloppe du bâtiment

5.1 *Optimalisation successive*

Lors de l'optimalisation thermique, trois étapes successives se présentent.

Le premier pas comprend la structuration et l'orientation optimales du bâtiment sur son lieu d'implantation.

Le deuxième stade comprend l'optimalisation de la conception des façades.

La troisième étape concerne l'optimalisation des différents éléments du bâtiment. On détermine pour ces derniers (parois, toiture, fenêtres, etc.) la meilleure conception du point de vue thermique. Ici également, la somme des différents éléments optimalisés ne conduit pas forcément à la solution globale optimale de l'enveloppe du bâtiment. Il est important de déterminer une répartition optimale des coûts de construction globaux sur les différents éléments du bâtiment. Cette procédure est décrite dans le chapitre suivant.

5.2 *Les divers éléments du bâtiment*

Lors du choix des épaisseurs optimales des matériaux isolants pour une structure donnée des parois, les caractéristiques thermiques de ceux-ci constituent l'outil approprié.

Ces caractéristiques définissent le rapport entre les frais annuels des investissements consacrés à l'isolation et les économies annuelles en énergie. La figure 11 montre les caractéristiques du toit d'un bâtiment polyvalent.

Fig. 11. — Diagramme des flux énergétiques (bâtiment administratif).

Lorsqu'il s'agit de déterminer l'investissement optimal du point de vue économique, il faut pondérer les économies d'énergie au moyen du prix de revient de cette dernière. L'épaisseur optimale de l'isolation est donnée par le minimum de la fonction de coût (K), représentant le total annuel des frais de chauffage (K_H) d'une part et d'isolation (K_{IS}) d'autre part:

$$K = K_H + K_{IS}$$

Deux paramètres méritent d'être considérés de plus près:

— La détermination du prix de revient de l'énergie pendant la durée de l'amortissement comporte une grande insécurité. La prise en compte des valeurs limites peut apporter une certaine aide.

— Les frais d'investissement par l'isolation se composent, entre autres, des contributions suivantes:

a) Coût des matériaux:
Selon le choix des matériaux et de l'épaisseur envisagée, on obtient par exemple 2 fr. 30 environ par m^2 et par cm d'épaisseur d'isolation.

b) Frais de montage:
Etant donné que, jusqu'à un certain point, les frais de montage sont indépendants de l'épaisseur de l'isolation, ils peuvent être attribués aux murs porteurs. Les constructions multicouches requièrent un traitement particulier.

c) Prix des terrains pour la superficie au sol de l'isolation:
Pour un prix de terrain de 500 fr. par m^2, par exemple, et une densité d'utilisation de 1,0, on obtient, en cas d'utilisation complète et pour une hauteur de 3,0 m par étage, des frais de terrain imputables à l'isolation d'environ 1,70 fr. par m^2 et par cm d'épaisseur de couche. Les frais entraînés sont donc du même ordre de grandeur que le coût des matériaux. L'opportunité de tenir compte des frais de terrain dépend du cas considéré.

d) Réduction du volume nécessaire pour les installations de chauffage et de la citerne grâce à la diminution des besoins annuels de chauffage et d'énergie (stockage):
Cette contribution réduit les frais d'investissement. Une prise en compte n'est possible que dans des cas précis.

e) Frais supplémentaires pour les ajouts (consoles et appuis de fenêtre, etc.) liés aux fortes épaisseurs d'isolation:
La prise en compte n'est possible que dans des cas particuliers.

La liste de ces différentes répartitions d'investissements montre premièrement que la fonction d'optimalisation doit être élaborée en particulier pour chaque cas. Souvent, la chose ne sera possible que sur la base d'offres concrètes. Deuxièmement, il ne peut s'agir que de déterminer la plage d'épaisseur optimale de l'isolation. Une plus grande précision n'est pas réaliste. Si l'on ne tient compte que du coût des matériaux, des épaisseurs comprises entre 8 et 14 cm deviennent acceptables.

Fig. 12. — Caractéristiques d'un élément de construction «toit» (bâtiment polyvalent).

5.3 *Ensemble de l'enveloppe du bâtiment*

a) Eléments de bâtiments analogues:
La répartition optimale des investissements sur des éléments analogues est immédiatement visible à l'aide d'un modèle. Si nous imaginons une enveloppe de bâtiment composée uniquement de matériau isolant, on observe des pertes minimales par conduction thermique quand tous les éléments partiels de l'enveloppe présentent la même épaisseur. En effet, si l'on enlève l'endroit A du matériau isolant et qu'on l'ajoute à l'endroit B, la consommation totale d'énergie augmentera, les pertes par transmission de chaleur s'accroissant plus fortement en A qu'elles ne diminueront en B. Cela est la conséquence directe de la fonction non linéaire entre pertes par transmission et épaisseur de la couche isolante.

Pour obtenir la solution énergétique optimale, il faut s'efforcer d'isoler toutes les parties de l'enveloppe du bâtiment avec la même efficacité.

b) Répartition optimale d'un investissement sur les différents éléments d'une enveloppe de bâtiment:
Le principe de la répartition est à nouveau illustré, sur la base du bâtiment polyvalent mentionné plus haut. Dans la fig. 13, on a représenté en abscisse les frais annuels des investissements pour l'amélioration thermique de certaines parties de bâtiment (toit, façades, fenêtres), en ordonnée les économies annuelles en énergie, telles qu'elles ont été calculées à l'aide du programme *Iglou-G.* Dans ce diagramme, chaque élément du bâtiment donne une courbe. Si on exécute par exemple un investissement entraînant des frais annuels de 4000 fr. pour le renforcement de l'isolation du toit, il en résulte une économie annuelle d'énergie de 260000 kWh. On obtient cependant de meilleurs résultats en n'investissant que la moitié pour le toit et l'autre moitié au profit des parois (300000 kWh). Il est évident que la répartition à parts égales entre le toit et les parois ne conduit pas encore à l'optimum, mais qu'au contraire celui-ci existe pour tous les éléments considérés du bâtiment (dans ce cas: toit, parois et fenêtres) avec la plus forte économie possible. Cette pondération optimale des investissements peut être déterminée graphiquement ou analytiquement et procure en même temps la courbe des plus grandes économies en énergie pour l'ensemble du bâtiment en

Fig. 13. — Caractéristiques d'éléments de construction (bâtiment polyvalent).

fonction des différents investissements. Cette courbe est appelée « caractéristique du bâtiment ». Elle est donnée dans la fig. 14 pour l'exemple du bâtiment polyvalent. La caractéristique du bâtiment représente donc la fonction optimalisée des économies réalisables pour l'ensemble du bâtiment considéré.

L'influence du prix de revient de l'énergie peut être introduite dans le diagramme (fig. 14) sous forme d'un faisceau de droites de prix (par ex. prix du mazout: 0,35, 0,60, 1,00 fr./kg).
Les points pour lesquels les gains d'économie sont plus petits que les investissements requis se trouvent dans la zone située en dessous des droites de prix, alors que ceux qui sont en dessus se trouvent dans la zone de gain.
L'investissement qui, pour le prix de revient énergétique correspondant, donne le gain maximal réalisable pour l'ensemble du bâtiment se situe au point de contact obtenu par translation des droites de prix en position tangentielle à la caractéristique du bâtiment.
Les mesures à prendre lors de la construction pour atteindre cet objectif sont alors déterminées par la caractéristique du bâtiment.
L'exemple donné est destiné à exposer la méthode et non à permettre d'en tirer des conclusions de caractère général valables, les résultats dépendant de chaque cas particulier.
Les démarches décrites ci-dessus permettent également une comparaison entre les différents agents énergétiques.

Fig. 14. — Caractéristiques du bâtiment (bâtiment polyvalent).

Bibliographie

[1] F. Haferland, W. Heindl, H. Fuchs: Ein Verfahren zur Ermittlung des wärmetechnischen Verhaltens ganzer Gebäude unter periodischen Belastungen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 99, Verlag Ernst u. Sohn (1975).

Adresse des auteurs:
Jürg Lanz, ingénieur civil EPFZ
Adolf Schopfer, ingénieur civil ETS
Motor-Columbus
Ingénieurs-Conseils SA
5401 Baden

Energie et éclairage

par Jürg Schatzmann, Turgi

1. Généralités

Bien qu'elle représente seulement 1,6% de la consommation énergétique totale de la Suisse, la consommation imputable à l'éclairage revêt cependant une importance non négligeable. Il paraît donc évident, dans le cadre de la politique d'économie actuelle, que ce secteur soit également touché par des mesures restrictives. Les raisons de la réaction populaire au sujet de ce problème peuvent en outre trouver l'explication suivante: *L'œil est l'organe humain d'information le plus important et la sensation de lumière est enregistrée de façon particulièrement vive; un gaspillage de lumière réel ou imaginaire est traité avec une sévérité excessive.* Cette préface n'a pas pour but de présenter toute économie de lumière comme illusoire, mais bien plutôt de mettre en évidence le problème des mesures d'économies particulières, dont l'importance, dans la conception globale de l'énergie, n'apparaît pas avec une clarté suffisante. Ce problème préoccupera encore longtemps les hommes politiques, les entrepreneurs et les ingénieurs.
Deux sujets importants, touchant à l'application de la technique de l'éclairage, seront analysés plus loin, à savoir:

— L'éclairage des places de travail, en particulier les bureaux
— L'éclairage routier

Pour les deux cas ci-dessus, nous tenterons de déterminer l'importance de la part de l'éclairage dans le cadre de la conception globale de l'énergie d'une construction d'une part et l'approche d'une solution optimum d'autre part.

1.1 *Notions d'éclairage et indices de qualité*

Dans l'éclairage naturel, le soleil représente la seule source lumineuse déterminante, l'atmosphère et le paysage formant les éléments de filtrage et d'orientation de la lumière. Dans l'éclairage artificiel, nous disposons d'une grande variété de sources lumineuses, ainsi que le démontre la fig. 1. Ces sources lumineuses sont incorporées dans des appareils d'éclairage, dont la répartition lumineuse ou l'orientation de la lumière est influencée par l'adjonction de réflecteurs, d'écrans, de verres et de filtres. En outre, ces luminaires sont équipés d'appareils auxiliaires et d'éléments de raccordement électrique destinés au fonctionnement des sources; ils assurent enfin une protection efficace contre les dangers d'incendie, les chocs électriques, l'empoussiérage et l'endommagement. La totalité des luminaires disposés dans une construction représente l'installation d'éclairage.
La multiplicité des sources lumineuses, en particulier leur forme, provient du fait qu'il existe, dans les installations d'éclairage, outre les critères énergétiques, de nombreux autres facteurs dont