

Le chauffage des églises

Autor(en): **Baumann, Ernst / Zehnder, Konrad / Rüegg, Thomas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **124 (1998)**

Heft 21

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79400>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Le chauffage des églises

Par Ernst Baumann, physique de la construction, ing. dipl. génie civil ETS et conseiller en énergie, Bahnhofstrasse 23, 9602 Bazenheid; Konrad Zehnder, Dr sc. nat., géologue, Institut pour la protection des monuments et des sites EPF Zurich, Hardturmstrasse 181, 8005 Zurich; Thomas Rüegg, Dr. sc. nat., physicien, Section installations du bâtiment, EMPA, 8600 Dübendorf

Traduction: Jean-Pierre Emery, EMPA, 8600 Dübendorf

Les difficultés de la recherche d'un équilibre entre les exigences de confort et les risques de dommages - l'exemple de la cathédrale de Coire

La rénovation des églises, avec des dépenses de 0,3 à 0,5 milliard de francs par année, représente une part importante des frais d'entretien du parc immobilier suisse [1]¹. Ces travaux comprennent des changements d'affectation et des améliorations de confort mais aussi des travaux nécessités par des dégradations et des dommages. Ces dégradations et ces dommages ne coûtent pas seulement beaucoup d'argent mais provoquent aussi la perte de biens culturels précieux.

La plupart des églises sont aujourd'hui chauffées. Or les dégradations constatées à l'intérieur, bien qu'essentiellement dues à la manière de chauffer, ne sont que rarement attribuées au mode d'exploitation, mais plutôt au type de chauffage en place, qu'il s'agisse

de systèmes tels que le chauffage sous les bancs, à air chaud ou par le sol. Il est cependant incontestable que de nombreux systèmes de commande de ces chauffages sont vétustes et n'offrent que peu de liberté de réglage, ce qui rend leur exploitation notablement plus difficile.

Les détériorations apparues sur les sculptures et le mobilier liturgique

Ce texte est la version française d'un article paru dans le N° 18 du 30 avril 1998 de SI+A. Nous remercions sincèrement nos confrères de leur autorisation ainsi que les auteurs grâce à qui nous pouvons publier cette contribution d'un remarquable intérêt à la fois technique et culturel.

Jean-Pierre Weibel, rédacteur en chef

de la cathédrale de Coire (fig. 1) et leur relation avec le chauffage mise en évidence par l'Institut pour la protection des monuments et des sites de l'EPF Zurich (IP/EPFZ) ont amené l'ordinariat épiscopal de Coire, conseillé par le service cantonal des monuments historiques, à rechercher une solution à ces problèmes. Les résultats de l'étude effectuée par le physicien spécialiste de la construction mandaté en collaboration avec l'IP/EPFZ et l'EMPA ont conduit à recommander la conservation du principe du chauffage à air chaud et le renoncement à un autre type de chauffage. Cela peut surprendre au premier abord, si l'on songe que la bouche d'amenée d'air chaud se trouve directement à côté du maître-autel. Pourtant, la question du confort thermique mise à part, le facteur décisif pour l'évolution future des dommages sera de savoir comment et à quelle température faire fonctionner le chauffage.

Les matériaux affectés et les risques qu'ils encourent

Considérées sous l'angle des matériaux, les églises anciennes sont des assemblages complexes de pierres, de mortiers, d'enduits, de bois, de verre et de métal, avec des aménagements intérieurs incluant des peintures murales, des stucs, des boiseries, des panneaux peints, etc. En tant que pièces uniques, leurs caractéristiques varient de cas en cas et à leur fragilité intrinsèque s'ajoutent souvent des défauts de mise en œuvre, des interventions défavorables ou des modifications fâcheuses des conditions climatiques internes, à la suite de réno-

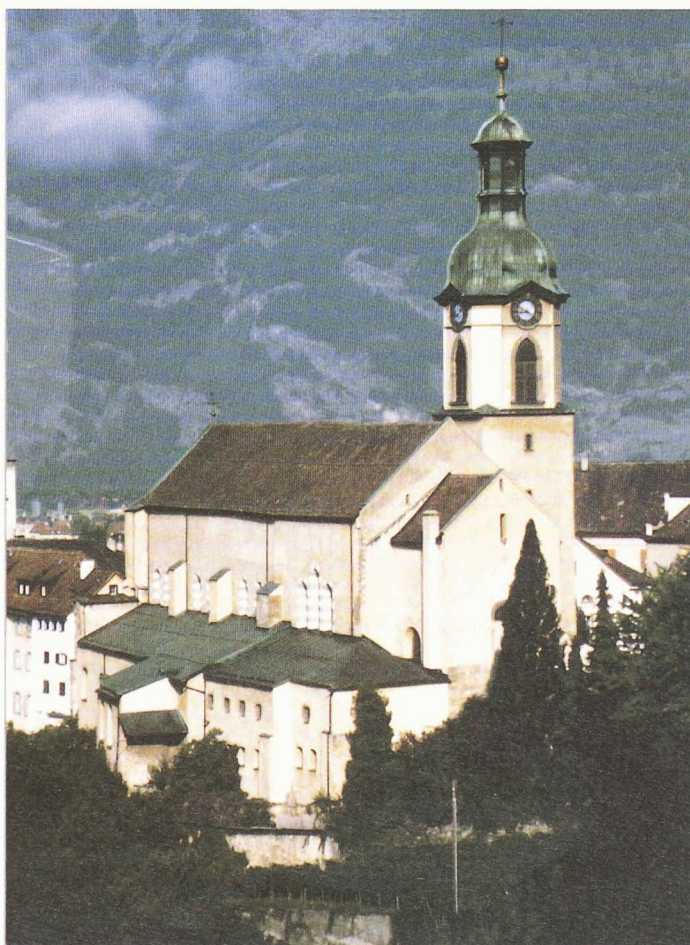


Fig. 1. – Cathédrale de Coire, vue du sud-est (photo: E. Baumann)

Type d'altération	Matériaux affectés
Forts mouvements de gonflement et de retrait provoqués par l'amplitude et la fréquence accrues des variations de l'humidité de l'air	Boiseries, panneaux peints, et orgue
Cristallisation accrues de sels durant les périodes de sécheresse extrême	Efflorescences de sels sur les pierres, les mortiers et les fresques
Accroissement des salissures provoquées par le transport, la déposition et l'adsorption de poussières et de suie	Parois et matériaux à l'intérieur en général et en particulier surfaces de parois froides
Infestation accrue par micro-organismes due à l'humidité élevée des matériaux	Matériaux dans les zones où l'humidité est élevée, souvent dans les zones de condensation

Fig. 2. – Altérations des matériaux en relation avec le chauffage

vations ou de restaurations. Notre tâche étant de conserver ces témoins de notre patrimoine culturel dans leur variété et leur authenticité, il importe donc que nous connaissions l'objet de nos soins, que nous en apprécions l'histoire et sachions appréhender les matériaux qui le composent et que nous évaluions correctement les risques auxquels il est exposé, afin d'agir de manière appropriée et adéquate [2, 3]. Cette démarche passe nécessairement par l'analyse des dommages et la mise en évidence du contexte où ils sont apparus.

La figure 2 résume les principaux dommages pouvant affecter les matériaux placés dans un environnement chauffé. Si des mouvements de gonflement et de retrait (fig. 3), des cristallisations salines, des salissures et des attaques dues à des micro-organismes peuvent certes apparaître en l'absence de chauffage, ces phénomènes sont

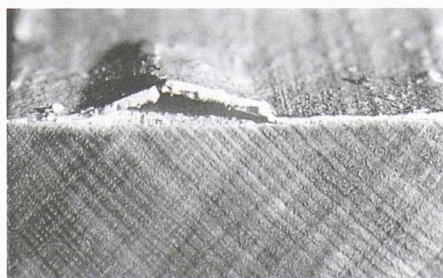


Fig. 3. – Décollement en forme de toit d'une couche de peinture sur bois provoqué par le retrait du bois sous l'action de l'air sec (largeur de l'image 18 mm, photo: K. Zehnder)

le plus souvent renforcés par ce dernier [4, 5]. À côté du chauffage, les matériaux sont encore exposés à d'autres facteurs potentiels de dommages tels que les variations naturelles de l'humidité de l'air et de la température, le rayonnement solaire, l'humidité en présence de sels ou les polluants atmosphériques entre autres. C'est pourquoi chaque cas concret appelle un examen détaillé des causes de dommages, afin de pouvoir y remédier avec succès.

Effets du chauffage sur le climat intérieur

Un chauffage des églises compatible avec les matériaux qui s'y trouvent et source d'un agréable confort peut fort bien ne pas créer de problèmes. À l'inverse, il y a des cas où le renoncement à tout chauffage s'impose sous peine de graves dommages, à l'exemple de l'église du couvent de Müstair dans les Grisons [4]. Pour préserver les fresques carolingiennes et romanes qui ornent cet édifice, le chauffage installé en 1950 a en effet dû être enlevé en 1988.

Entre ces deux extrêmes, le chauffage de la plupart des églises est une tâche difficile qui ressemble un peu à un exercice de corde raide. Lorsque les lieux sont occupés, ils doivent en effet offrir le confort désiré, tandis qu'un climat intérieur globa-

lement compatible avec la préservation des matériaux doit par ailleurs être assuré en permanence. À cela s'ajoute que les églises connaissent la durée d'occupation la plus faible de toutes les catégories d'immeubles chauffés, puisque dans la plupart des cas, celle-ci n'excède pas quelques heures par semaine. Pourtant, de nombreuses églises sont chauffées à des températures moyennes hebdomadaires bien supérieures à 12° C même lorsque la température extérieure est très basse, car on part du principe qu'un chauffage permanent est préférable à des changements continus de la température intérieure et que l'on économise ainsi davantage d'énergie. En fait, les effets du chauffage sur le climat intérieur sont multiples [1, 6]. Les principaux facteurs qui influent sur le climat intérieur (et donc la consommation d'énergie), ainsi que sur le confort et le potentiel d'apparition de dommages sont les suivants :

- le système de distribution de chaleur, soit un chauffage par le sol à fonctionnement permanent ou une exploitation intermittente avec radiateurs sous les bancs, radiateurs à gaz ou électriques, radiateurs muraux ou chauffage à air chaud ;
- une humidification de l'air combinée avec le chauffage ;
- la régulation de la température, telle qu'elle est par exemple gérée avec un chauffage à réglage continu avec commande automatique ou manuelle, avec ou sans contrôle de la température intérieure par thermostat d'ambiance ;
- la vitesse de chauffage et d'abaissement de la température, soit le chauffage rapide d'une église complètement refroidie ou la faible augmentation de la température intérieure ;
- le nombre et durée des événements de chauffage, p. ex. chauffage journalier, hebdomadaire ou sporadique durant quelques heures, jours ou semaines ;
- la température moyenne ;

- la présence de flux d'air, telles que des retombées d'air froid, par exemple.

Cela étant, le chauffage ne représente qu'un des paramètres - bien qu'important - qui agissent sur le climat dans une église. Les conditions qui y règnent sont également tributaires des facteurs suivants :

- le climat extérieur régional et local (température et humidité moyennes de l'air, durée d'ensoleillement, volumes de précipitations, vents, etc.);
- l'implantation et l'orientation de l'ouvrage ou du local considéré dans son environnement;
- la taille, la forme et le mode de construction de l'ouvrage;
- les matériaux constituant l'enveloppe et l'intérieur du bâtiment, en particulier du point de vue de leur comportement thermique et hygrique, p. ex. présence de bois absorbant bien l'humidité ou d'une barrière de vapeur, d'une isolation thermique, de fenêtres isolées, etc.,
- le mode et l'intensité de l'occupation des locaux, soit le nombre et la durée de séjour des visiteurs, les habitudes d'aération, la production de suie et de poussière, etc.

L'exemple de la cathédrale de Coire

Les dommages

La cathédrale de Coire, qui est une des églises romanes les plus importantes de Suisse (XII^e-XIII^e siècle), abrite de nombreuses sculptures et dalles funéraires en pierre de Scalära, un tabernacle en molasse, des fresques, un célèbre maître-autel (fig. 4) et d'autres autels ornés de boiseries, des peintures sur bois, des stucs et des vitraux polychromes, pour ne citer que ses principaux joyaux.

Sur la base d'observations et de mesures du climat intérieur effectuées depuis 1989, l'Institut pour la protection des monuments de l'EPFZ a surtout relevé les altérations décrites ci-après.

- L'écaillage et la désagrégation de la pierre de Scalära et de la mo-

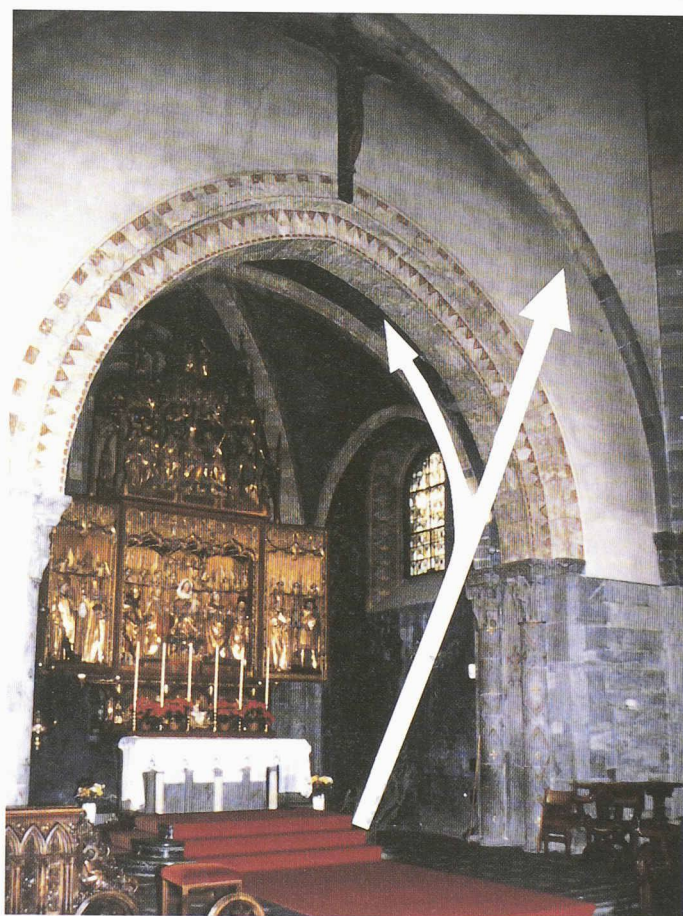


Fig. 4.- Cathédrale de Coire, vue sur le chœur avec le maître-autel. Les flèches indiquent le parcours de l'air chaud issu de la bouche de sortie du chauffage, avec une inflexion partielle à l'obstacle de l'arche (photo: E. Baumann)

lasse provoqués par la cristallisation de sels accumulés par des remontées d'humidité dans la maçonnerie. Durant les périodes où le climat intérieur est sec, avec des taux d'humidité relative inférieurs à 60 %, on assiste essentiellement à la cristallisation de nitrate de sodium et de nitrate de potassium. À côté des fortes efflorescences dues au chauffage en hiver, d'autres, plus modestes, se produisent aussi lorsque le climat extérieur est sec. Comme la maçonnerie réagit de manière relativement lente aux variations de l'humidité de l'air, l'action des variations climatiques sur la cristallisation des sels se trouve amortie et ses effets correspondent aux influences moyennes calculées sur plusieurs jours et davantage.

- Les fissures et éclats toujours plus nombreux, constatés au cours des années par le restaurateur Oskar Emmenegger (Zizers) sur les boiseries du maître-autel et les retables des autres autels. Il s'agit là de dégradations provoquées par les fortes variations de l'humidité de l'air dues au chauffage. Comme le bois et les couches de vernis réagissent rapidement aux variations d'humidité, de courtes modifications du climat intérieur, même limitées à quelques heures, s'avèrent déjà néfastes pour ces matériaux et s'ajoutent aux variations à moyen et long terme.

Type et mode d'exploitation du chauffage

La chauffage à air chaud installé en 1938 (et rénové en 1979) est

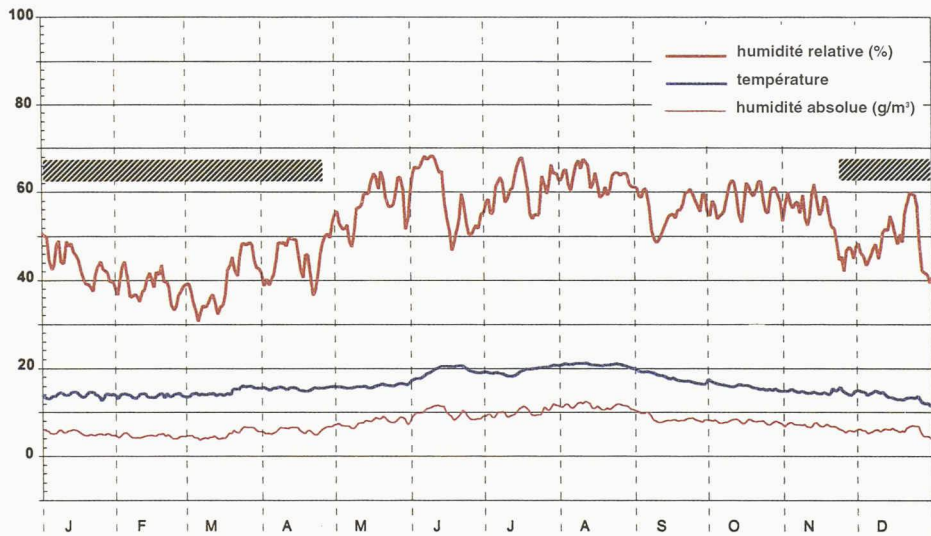
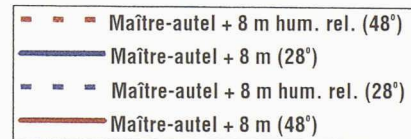
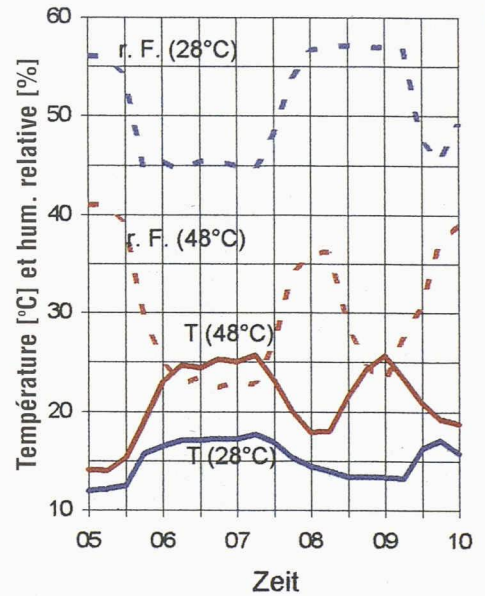


Fig. 5. - Cathédrale de Coire. Climat intérieur durant l'année 1996 (moyennes journalières de la température, de l'humidité relative et de l'humidité absolue près du maître-autel à +3 m). Les périodes où de fortes efflorescences de sels se sont produites sont marquées d'un trait large.

un chauffage à air circulé. En outre, les bancs des premières et des dernières rangées de la nef sont chauffés à l'aide de radiateurs électriques tubulaires. L'air chaud sort d'une ouverture grillagée de 1,6 m² ménagée dans le sol à côté du maître-autel et parvient dans la nef centrale et les nefs latérales à travers la voûte du chœur pour retourner ensuite comme air évacué vers le registre de chauffage à travers la crypte. Lorsque le chauffage est enclenché, l'air est humidifié artificiellement, bien que l'ampleur de cet apport d'humidité demeure incertain (l'humidification artificielle ne fonctionnait pas toujours durant les mesures). Lorsque la température extérieure descend au-dessous de 3° à 5°C, le sacristain commence à chauffer. Il enclenche et déclenche le chauffage chaque jour, bien qu'un fonctionnement automatique de l'installation soit possible (des thermostats d'ambiance se trouvent dans le chœur). La période de chauffage s'étend d'environ début novembre à mi-avril. Jusqu'à fin 1996, avec une température de l'air chaud fixée à 48°C, on a maintenu une température intérieure de 14° à 18°C durant les offices (selon la température extérieure et l'emplacement dans la cathédrale). Le cli-

Fig. 6 - Cathédrale de Coire. Comparaison de la température (trait tiré) et de l'humidité relative (trait interrompu) près du maître-autel lors du chauffage avec de l'air chaud à 48°C (rouge) et à 28°C (bleu)



mat intérieur moyen durant la période de chauffage s'établit à environ 13°C avec une humidité relative de l'air de 30 % à 50 %.

L'évolution du climat intérieur

Les événements énumérés ci-dessous peuvent être distingués comme facteurs concourant à l'évolution du climat intérieur.

- Variations saisonnières. En moyenne hebdomadaire, la température intérieure varie entre un minimum hivernal de 12 à 13°C, avec une humidité relative de 35 % à 40 %, et un maximum estival de 14 à 18°C, avec une humidité relative de 60 à 65 %. Les variations saisonnières de l'humidité relative à l'intérieur de la cathédrale atteignent ainsi environ 20 % et elles sont dues au chauffage.
- Variations météorologiques extérieures. Les changements de temps sont à l'origine de variations irrégulières du climat intérieur, dont la durée est de l'ordre du jour ou de la semaine et qui

oscillent de 1 à 3°C, respectivement de 5 à 15 % d'humidité relative. Il se produit environ 60 à 80 de ces événements par année avec des variations de l'humidité relative de 10 % et plus.

- Variations journalières. Hors de la période de chauffage, ces variations à court terme atteignent au maximum 1°C pour la température et quelques pour-cent pour l'humidité relative. Du fait du fort amortissement dû à la masse du bâtiment, elles n'ont qu'une amplitude très faible. Quant au *chauffage journalier intermittent*, il provoque, dans les zones où les personnes séjournent, des variations journalières de 2 à 6°C pour la température et de 2 à 6 % pour l'humidité relative. La diminution de cette dernière pendant la montée en température est amortie par l'échange d'humidité avec la masse de la construction et par l'humidification artificielle temporaire. Les écoulements d'air

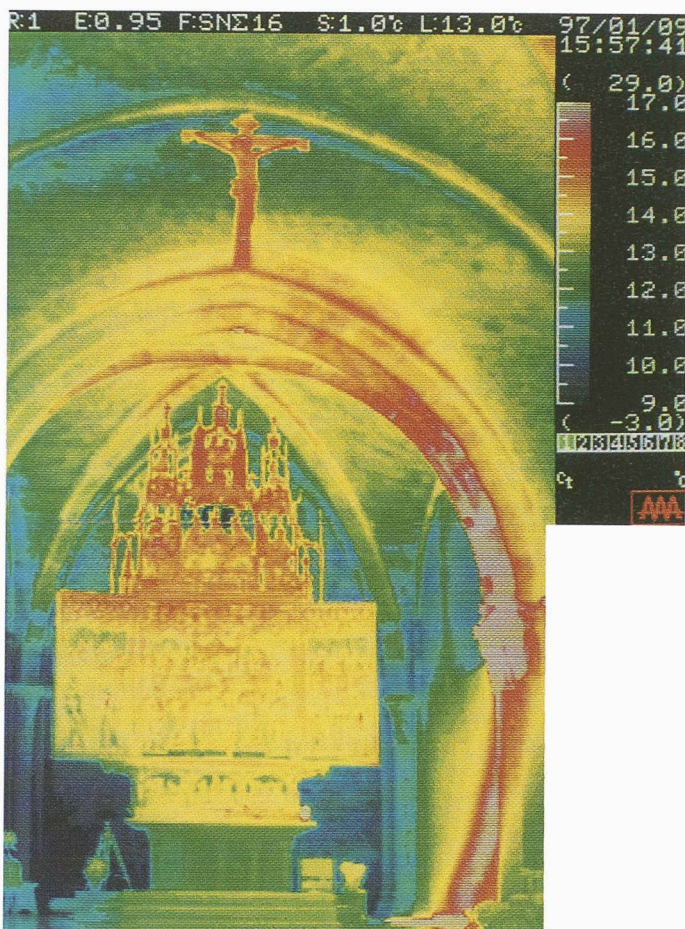


Fig. 7.- Cathédrale de Coire. Thermogramme de la zone de l'autel lors d'un chauffage modéré (température de sortie de l'air chaud: 28°C) le 9.1.97. L'échelle de couleur du bleu au rouge correspond au domaine de température de 10 à 60°C. On distingue clairement le réchauffement plus fort de la partie supérieure du maître-autel (rouge) et les parties des murs et de l'arche du chœur réchauffées par le jet d'air chaud (rouge clair).

points de l'espace intérieur, enregistré des thermogrammes des surfaces critiques et établi un modèle global des écoulements d'air par visualisation à l'aide de brouillard. Les principaux résultats de ces observations sont les suivants.

- Le mode d'exploitation du chauffage pratiqué jusqu'ici (avec une température de l'air chaud de 48°C à la bouche de sortie), entraîne un réchauffement de l'air à une température de 25°C dans la voûte du chœur et dans la zone supérieure du maître-autel (valeur maximale 27°C). La différence entre la zone supérieure et la zone inférieure du maître-autel atteint 7 à 8°C. Simultanément, l'humidité relative de l'air chute de plus de 15% dans la zone supérieure. Par conséquent, le réchauffement dans la partie supérieure du chœur est presque deux fois plus important que dans sa partie inférieure ou dans la nef. Il est essentiellement provoqué par une retenue de l'air chaud sous la voûte du chœur (fig. 4, 5 et 6).
- Une exploitation réduite du chauffage et une température moyenne de l'air chaud de 28°C à la bouche de sortie, réduisent les écarts de température de moitié environ avec une répartition

relevés (fig. 8) expliquent comment l'air chaud se répartit dans toute la nef centrale jusqu'à la galerie et pourquoi la montée en température ne demande que peu de temps. Il se produit au total environ 160 de ces événements de chauffage par année.

Modifications apportées et effets sur le climat intérieur

Depuis l'été 1996, le programme de mesure de l'IP/EPFZ a été élargi pour procéder à une analyse fine du chauffage et émettre des propositions pour son amélioration. Lors de ces campagnes de mesure effectuées en commun durant les mois de janvier 1997 et 1998, on a mesuré les températures en plusieurs

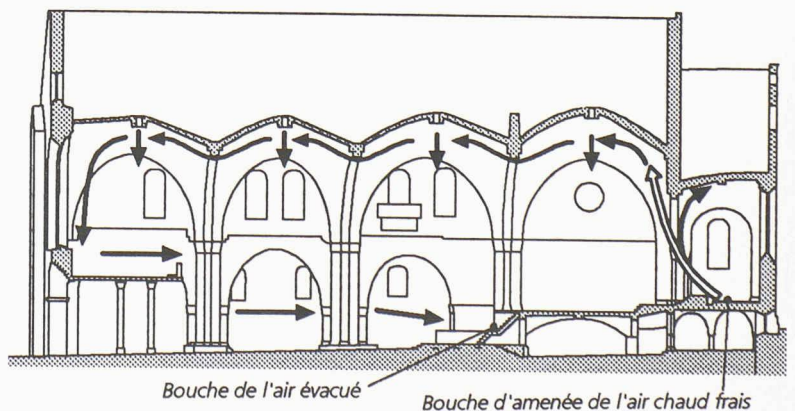


Fig. 8.- Cathédrale de Coire. Schéma des écoulements d'air durant les phases de chauffage. La flèche blanche indique le trajet du jet d'air descendant sortant du chœur. Les flèches noires indiquent la déviation d'une partie du jet d'air en retour vers le chœur, les écoulements d'air en direction de la galerie le long des lignes de sommet des voûtes, les écoulements latéraux partant du sommet des voûtes vers les parois latérales froides, la retombée d'air froid le long de la paroi ouest vers la galerie et l'écoulement en retour lent vers la bouche d'évacuation de l'air dans la crypte.

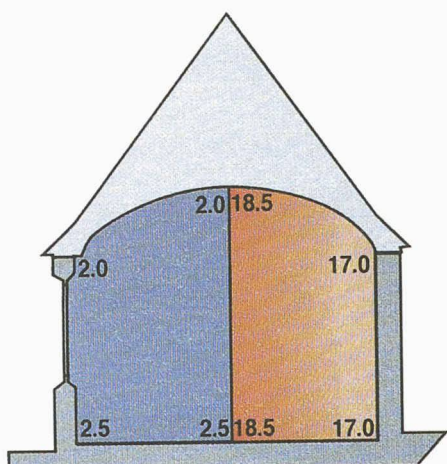


Fig. 9.- Eglise réformée d'Ebnat avec chauffage sous les bancs et ancien système de commande (mode de chauffage intermittent). Températures mesurées à une température extérieure de -3°C ; à gauche sans chauffage; à droite avec chauffage. Conditions relevées six heures après l'enclenchement du chauffage: augmentation rapide de la température ambiante de 15 K en l'espace de six heures, forts écoulements d'air froid, températures égales à hauteur des bancs et sous le plafond.

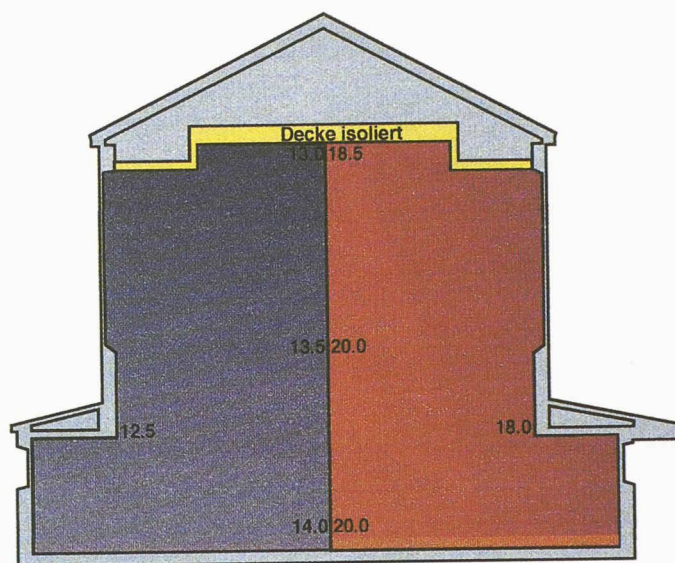


Fig. 10.- Eglise catholique d'Uzwil avec chauffage par le sol (mode de chauffage permanent). Températures mesurées à une température extérieure de -1°C , à gauche à l'état tempéré, à droite dans les conditions relevées trois heures après l'enclenchement du chauffage: augmentation de la température de l'air ambiant de 2 K au niveau des bancs (capteurs de température sous les bancs), écoulements d'air froid lorsque le nombre des occupants est élevé.

spatiale analogue. Le réchauffement de la partie supérieure de l'autel est plus élevé de 4°C que celui de la partie inférieure et atteint environ 17°C . Simultanément, l'humidité relative de l'air dans la partie supérieure de l'autel chute encore d'environ 10%. Avec cette température réduite de l'air chaud à la bouche de sortie, les autres conditions demeurant égales, la température moyenne en hiver diminuerait de 1 à 2°C pour atteindre environ 10°C . Un confort thermique semblable peut être obtenu avec la prolongation de la phase de montée en température.

- Un déplacement de la bouche de sortie de l'air chaud de 4 m vers l'avant du chœur, en combinaison avec une exploitation réduite du chauffage (température de l'air chaud 28°C), permet d'obtenir une amélioration supplémentaire. La zone supérieure du maître-autel ne présenterait une température que de 1 à 2°C plus élevée que sa partie inférieure, avec une chute de l'humidité relative de l'air d'environ 5%. Ce

nouvel emplacement de la bouche d'air évite la retenue d'air chaud sous la voûte du chœur, de sorte que la répartition verticale de la température dans le chœur est la même que dans le reste de l'église.

Quels effets ces modifications sont-elles susceptibles d'exercer sur l'altération des matériaux ?

- L'exploitation réduite du chauffage et le déplacement de la bouche d'amenée d'air chaud permettent de réduire de moitié les variations de la température et de l'humidité de l'air dans la partie basse et d'environ deux tiers dans la partie haute de l'autel par rapport au mode d'exploitation du chauffage pratiqué jusqu'ici. On peut admettre que les sollicitations provoquées par les mouvements de gonflement et de retrait des boiseries et ainsi leur endommagement devraient diminuer dans une mesure semblable. Cela demande toutefois encore à être confirmé par des observations sur l'objet.
- La réduction de 1 à 2°C de la température moyenne par rap-

port à la moyenne actuelle entraîne une augmentation d'environ 5% de l'humidité relative moyenne de l'air durant la période de chauffage. Cet affaiblissement des variations saisonnières de l'humidité relative de l'air devrait aboutir à une réduction tendancielle des dommages sur les boiseries et les pierres.

- Les variations de l'humidité de l'air dues aux conditions atmosphériques restent par contre inchangées de même que leurs effets. Précisons encore que toutes les interventions et améliorations envisagées doivent dans chaque cas – et en particulier pour des objets aussi délicats et précieux – être contrôlées quant à leurs effets réels sur le climat intérieur et sur l'évolution des dommages.

Comparaison des systèmes de chauffage des églises les plus répandus

Avec le chauffage par radiateurs disposés sous les bancs, la répartition spatiale des températures de l'air est très régulière, (fig. 9, moi-

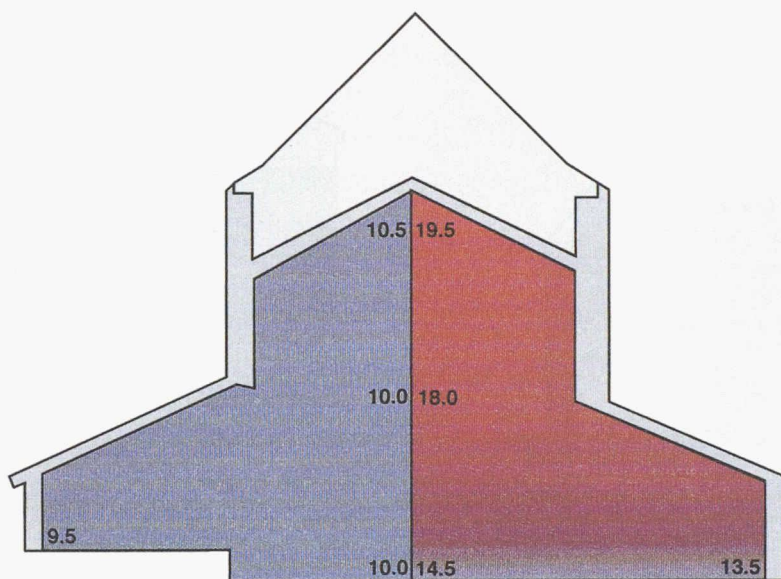


Fig. 11.— Cathédrale de Coire avec chauffage à air chaud, (mode de fonctionnement intermittent). Températures mesurées à une température extérieure de 0°C et pour une température de sortie de l'air chaud de 48°C, à gauche sans chauffage, à droite deux heures après l'enclenchement du chauffage: augmentation journalière rapide de la température ambiante de 1 à 5 K suivant les endroits, faibles écoulements d'air froid, températures variables et plus basses à hauteur des bancs que sous le plafond.

tié droite) car le chauffage s'effectue principalement par convection et qu'il se crée au-dessus des bancs de l'église une vaste zone ascensionnelle, qui déclenche une circulation dans tout le volume principal. Les systèmes de régulation modernes permettant une réduction sans délai de la distribution de chaleur, il est ainsi possible d'obtenir un bon confort sans écoulements d'air froid trop importants lorsque l'église est occupée. L'avantage sur le plan de la consommation d'énergie est que la grande puissance spécifique de ce type de chauffage permet de l'enclencher quelques heures seulement avant l'occupation des locaux et de maintenir ainsi de courtes phases de chauffage. Du fait de l'absence de banc dans le chœur, la puissance de chauffage installée dans cette zone est souvent insuffisante et il s'y crée une circulation longitudinale accrue nuisible au confort.

Le chauffage par le sol aboutit lui aussi une répartition spatiale des températures assez régulière (fig. 10, moitié droite). Du fait de la faible puissance de chauffage spé-

cifique et de l'inertie de la masse du plancher, il est le plus souvent nécessaire de laisser fonctionner le chauffage sans interruption, de sorte qu'il n'est pas possible de procéder à un abaissement important de la température entre les périodes d'utilisation des locaux. Les températures moyennes résultantes sont ainsi élevées et l'humidité relative moyenne de l'air basse. Les expériences positives réalisées avec les chauffages par le sol dans les locaux d'habitation ne se laissent pas sans autre transposer à des locaux de grande hauteur, mal isolés, tels que les églises. On est surpris de constater qu'il se produit des courants d'air désagréables même lorsque le chauffage est enclenché. En particulier avec des densités d'occupation élevées, il peut se produire des écoulements d'air froid car la chaleur dégagée par les personnes présentes provoque des courants ascensionnels importants qui entraînent une circulation accrue et des retombées d'air froid plus importantes. Une amélioration peut être obtenue en posant une isolation thermique et éventuellement aussi par un chauffage des fenêtres.

Au contraire des deux systèmes précédents, avec le chauffage à air chaud la température de l'air sous le plafond est notablement plus élevée qu'au voisinage du sol lorsque le chauffage fonctionne (fig. 11, moitié droite). La majeure partie de l'énergie est tout d'abord transportée vers le haut, puis distribuée dans tout le volume de l'église. Il se crée une stratification stable de la température avec une bulle d'air chaud sous le plafond. Les retombées d'air froid le long des fenêtres et des parois extérieures sont plus faibles et moins fréquentes, en raison de la faible différence de température entre l'air chaud descendant de la zone où se tient le public et la bulle d'air chaud située sous le plafond. Comme le montre la figure 8, la circulation d'air qui se produit conduit très rapidement à une distribution de la chaleur dans la plus grande partie du volume. Le fait que les zones non atteintes par la circulation d'air soient moins chauffées constitue toutefois un désavantage. Cela étant, les effets des différents types de chauffage sur l'apparition de dommages dépendent dans une large mesure des conditions auxquelles est soumis l'ouvrage, du mode d'exploitation du chauffage et surtout de la sensibilité des matériaux. D'une manière schématique et sous forme d'indication de tendances, les effets auxquels on peut s'attendre sont les suivants.

- Une température moyenne élevée et une humidité relative basse dues à un chauffage permanent, renforcent notablement la cristallisation de sels dans les murs et provoquent des mouvements saisonniers de gonflement et de retrait dans le bois.
- Les variations à court terme de l'humidité de l'air dues à une exploitation intermittente du chauffage provoquent des mouvements de gonflement et de retrait dans les couches de vernis et dans le bois. L'amplitude de ces mouvements dépend de la force et de la durée des événements de chauffage. Les varia-

tions de température exercent en outre une influence sur la tonalité de l'orgue.

- *Les différences entre les températures de l'air et des murs* ou des surfaces des fenêtres provoquent des écoulements d'air froid, de la condensation et des dépôts de poussière foncés sur les surfaces des murs froides et humides. Précisément sur ce point, le chauffage à air chaud présente l'avantage de permettre une filtration de l'air.

Conclusions

Les études effectuées sur la cathédrale de Coire et sur de nombreuses autres églises montrent clairement que c'est moins le système de chauffage que le mode d'exploitation du chauffage qui influence l'évolution de dommages. D'une manière générale, on peut dire que plus on chauffe plus il se produit de dommages.

L'absence d'un chauffage est en règle générale compatible avec les matériaux comme le prouvent de nombreuses églises anciennes avec leur intérieur et leur mobilier intacts. Un exemple bien connu est l'église Bel Taimpel à Celerina (GR) qui date de trois cents ans et qui a été rénovée complètement pour la première fois (!) en 1995 précisément pour y installer un chauffage. Le chauffage sert donc souvent à satisfaire les exigences de confort actuelles et non pas celles que pose la conservation des matériaux. Là encore, il existe cependant des exceptions, puisqu'un chauffage adéquat (modéré) peut aussi être utilisé pour la prévention de dommages, mais dans la plupart des cas, un chauffage compatible avec les matériaux pose des exigences élevées quant aux modalités de son exploitation.

L'exemple de la cathédrale de Coire montre qu'une modification des conditions d'exploitation peut conduire à une amélioration notable du climat intérieur global dans le sens d'une réduction des sollicitations. Avec de petites adaptations apportées à la construction, il serait même pos-

sible de maintenir la sortie d'air chaud à son emplacement actuel à côté du maître-autel. Les résultats de l'étude effectuée permettent donc de recommander la conservation du principe du chauffage à air chaud, ce qui permet finalement d'éviter une intervention profonde dans la substance du bâtiment et de réaliser aussi des économies importantes.

Les chauffages à air chaud modernes ne sont plus comparables aux anciennes installations du même type, bruyantes et de conception dépassée. Equipés et exploités avec un dispositif de commande «intelligent», ils sont en mesure d'offrir le confort désiré durant les périodes (le plus souvent courtes) d'utilisation des locaux tout en permettant une exploitation qui ménage autant que possible la construction et l'aménagement intérieur le reste du temps.

Recommandations

Lors de la rénovation d'églises, on a souvent attribué sans éclaircissements préalables l'origine des dommages et du manque de confort au chauffage par radiateurs placés sous les bancs ou au chauffage à air chaud, pour installer un chauffage par le sol. Après cela, on s'est étonné que des retombées d'air froid et la puissance de chauffage restreinte contraignent à tempérer les locaux en permanence et que les dommages continuent à progresser ou s'aggravent même encore, cela parce que l'on n'avait pas reconnu ni supprimé les causes exactes. Les économies d'énergie n'ont pas non plus atteint ce que l'on espérait.

Chaque fois que les conditions données appellent des éclaircissements, il est donc nécessaire de procéder à des examens qui prennent en considération les problèmes concrets que présente l'objet. Les résultats obtenus constitueront une base de décision réaliste pour l'obtention du confort désiré ou possible, tout en assurant l'absence de dommages au bâtiment et à son aménagement intérieur. Là

aussi, les dépenses consacrées à des observations effectuées suffisamment tôt sont le plus souvent rentables. Dans tous les cas l'objectif devrait viser une utilisation qui épouse la substance du bâtiment et qui s'avère, à long terme, compatible avec elle.

Bibliographie

- [1] BAUMANN, E.: «Kirchenrenovationen. Unterhalt der Kirchen: "Altlast" von morgen?» *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Jg. 113, Heft 37, 4-8, 1995
- [2] ARNOLD, A.: «Naturwissenschaft und Denkmalpflege», *Bündner Monatsblatt*, 4/1990, 251-274, 1990
- [3] ARNOLD, A.: «Altération et conservation d'œuvres culturelles en matériaux poreux affectés par des sels», Le dessalement des matériaux poreux, 3-20. 7^{es} journées d'études de la SFIC, Poitiers, 9-10 mai 1996, SFIC, Champs-sur-Marne, 3-20, 1996
- [4] ARNOLD, A.; ZEHNDER, K.; KÜNG, A.; EMMENEGGER, O.: «Wandmalereizerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair», *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Jg. 5, Heft 2, 171-200, 1991
- [5] ZEHNDER, K.; KÜNG, A.; ARNOLD, A.: «Das Raumklima», in «Die romanische Bilderdecke der Kirche St. Martin in Zillis», 169-226, éd. Paul Haupt, Bern, 1997
- [6] HUNGERBÜHLER, E.: «Dimensionierung, Sanierung und Betrieb von Elektroheizungen in Kirchen», EDMZ Bericht Nr. 724.397.23.60 D, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1994
- [7] TANNER, C.; STANGIER, R.; RÜEGG, T.: «Untersuchungen der evangelischen Kirche Ebnet: Luftdichtheit, Luftwechsel und Strömungsmuster», EMPA-Berichte Nr. 144'994/1, 144'995 und 144'994/2, 1993