

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 122 (1996)
Heft: 10

Artikel: Anticipation des gains solaires et internes dans le bâtiment
Autor: Oestreicher, Y. / Bauer, M. / Scartezzini, J.-L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78840>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

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

Anticipation des gains solaires et internes dans le bâtiment

Par Y. Oestreicher,
M. Bauer et
J.-L. Scartezzini
CUEPE, Université
de Genève
Adresse actuelle:
LESO-PB, EPFL,
1015 Lausanne

Economies d'énergie et amélioration du confort thermique

1. Introduction

La qualité de l'enveloppe des bâtiments actuels, ainsi que la croissance du parc informatique dans le tertiaire, ont pour conséquence qu'une part de plus en plus importante de leurs besoins en chaleur est fournie par les gains internes et solaires. La conception optimale d'un bâtiment ne doit ainsi plus être uniquement synonyme d'isolation thermique (murs, fenêtres) et d'intégration d'éléments solaires passifs ou actifs (véranda, capteurs à eau chaude): un contrôle optimal des installations techniques, tenant compte à la fois de la consommation d'énergie, du confort thermique et de l'inertie du bâtiment, s'avère aussi nécessaire.

Il n'est pas facile de concevoir une régulation de chauffage, visant à la fois à optimiser le confort de l'utilisateur et à réduire la consommation d'énergie. On peut distinguer trois principales stratégies de régulation couramment utilisées dans le bâtiment:

1) *Réglage en boucle fermée sur la température intérieure.*

Cette stratégie permet de prendre en compte de manière instantanée toute variation des apports solaires et internes. Le chauffage est coupé, ou enclenché, lorsque l'on s'éloigne de la consigne de température intérieure. Toutefois, cette stratégie fonctionne mal en présence de perturbations au niveau de la sonde intérieure de mesure (ouvertures de fenêtres, gains internes localisés). Ce principe n'est par ailleurs absolument pas adapté à des systèmes de chauffage à grande inertie (chauffage par le sol).

2) *Réglage en boucle ouverte sur la température extérieure*

Cette stratégie de régulation est la plus courante en Suisse. Elle permet de s'affranchir des perturbations propres à une sonde inté-

rieure et peut être appliquée à des systèmes de chauffage à grande inertie. Elle est cependant mal adaptée aux intermittences (réduction nocturne) et ne tient aucun compte des apports gratuits. Des surchauffes et un gaspillage en sont souvent la conséquence.

3) *Combinaison d'un réglage de base en boucle ouverte sur la température extérieure et de vannes thermostatiques.*

Cette solution est généralement adoptée pour des habitations de type locatif munies de radiateurs. Elle allie les avantages de la boucle ouverte et d'une boucle fermée (prise en compte instantanée des apports gratuits).

Aucun de ces systèmes n'est cependant capable de prendre en compte la nature aléatoire des gains gratuits et d'anticiper les commandes de chauffage, du fait du comportement inertiel du bâtiment et des installations techniques. Une consommation inutile d'énergie (sous-utilisation des apports gratuits) et un confort réduit des occupants (surchauffes à mission) en résultent.

On relèvera qu'il existe sur le marché des produits plus perfectionnés visant à améliorer l'un ou l'autre de ces points: la régulation en boucle ouverte avec « optimal start and stop » vise ainsi à gérer l'inertie du dispositif de chauffage au niveau des intermittences (réduction de la consigne). Ce système, peu répandu, donne toutefois des résultats mitigés; de plus, il est incapable de gérer les apports solaires et gratuits. D'autres dispositifs intègrent une sonde solaire et modifient les commandes de chauffage en cas d'ensoleillement. Aucune anticipation, pourtant indispensable aux systèmes très inertiels, n'est cependant effectuée.

Une régulation prévisionnelle, basée sur le principe du contrôle stochastique optimal, a été développée dans le but de contourner cette difficulté; elle est à même d'optimiser les apports de *chaleur* et de *froid* d'un bâtiment, en tenant compte:

- du comportement aléatoire des principales grandeurs météorologiques (rayonnement solaire, température extérieure);
- de la contribution variable des gains internes (éclairage, occupants, appareils électriques);

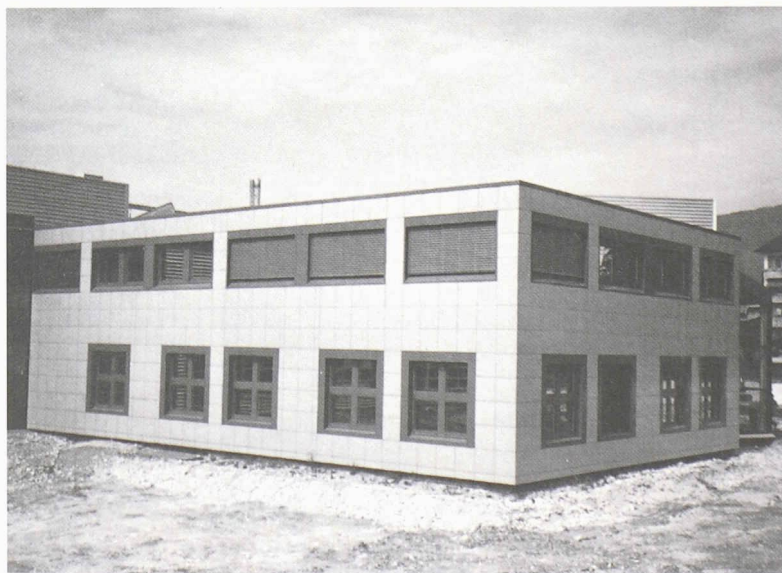


Fig. 1.- Le bâtiment étudié (bâtiment administratif de Schäublin à Delémont)

Tableau 1 - Performances du vitrage HIT

Caractéristiques des vitrages	Valeurs
Coefficient surfacique de déperditions thermiques k [W/m ² K]	0,66
Facteur de transmission lumineuse t [-]	0,58
Facteur de transmission énergétique globale g [-]	0,42

Tableau 2 - Surfaces de plancher et volumes chauffés

Zone	Surface nette de vitrage [m ²]	Surface de plancher [m ²]	Volume [m ³]
Est	57	590	1770
Ouest	78	688	2100
Total	135	1278	3870

• du comportement dynamique du bâtiment (inertie thermique). Un premier dispositif a été testé, avec succès, en 1989/1990 dans deux locaux à gains solaires directs du bâtiment expérimental LESO de l'EPFL [3]¹, équipés d'un chauffage par le sol: 27 % d'économies par rapport à une régulation conventionnelle et une amélioration significative du confort thermique ont été observées au cours de deux saisons d'hiver.

L'expérience a été renouvelée récemment, dans des conditions plus proches de la pratique, dans deux villas solaires actives pourvues d'un chauffage par le sol [9]: une économie d'énergie de 20 % sur la saison de chauffage a été obtenue dans ce cas, simultanément à une amélioration du confort thermique.

Le but du travail présenté ici est d'étendre le champ d'application de la régulation prévisionnelle à la gestion énergétique de bâtiments en période estivale, non réalisée jusqu'à aujourd'hui, et d'assurer la régulation de bâtiments plus complexes. La démarche adoptée est semblable à celle des cas mentionnés précédemment: les indicateurs de performances énergétiques de la régulation prévisionnelle ont été comparés à ceux

d'une régulation conventionnelle installée dans le même bâtiment. Les prestations de confort thermique ont, par ailleurs, été analysées pour les deux types de régulation à l'aide de questionnaires remplis par les occupants et par l'intermédiaire du suivi expérimental du bâtiment (température de l'air, température des surfaces de plancher et de plafond).

2. Description du bâtiment

Le bâtiment étudié (fig. 1) est celui occupé par le personnel administratif de l'usine *Schäublin* à Delémont (alt. 431 m).

Il est pourvu de vitrages, répartis de façon semblable sur toutes les orientations. Les gains solaires qui en résultent en façade sud-est et sud-ouest sont toutefois faibles, compte tenu de l'ombre portée par le bâtiment voisin. D'autre part, ces apports sont encore réduits par l'épaisseur des percements, l'importance des cadres et la valeur modeste du coefficient de transmission énergétique des vitrages (vitrages HIT).

Les tableaux 1 et 2 donnent les caractéristiques principales de ces vitrages. La réduction des gains solaires, due à leur facteur de transmission énergétique ($g = 0,42$), est toutefois largement compensée par la réduction des pertes énergétiques du vitrage ($k = 0,66$ W/m²K). Le bâtiment comprend deux niveaux (un étage sur rez). On dis-

tingue deux zones («est» et «ouest»), qui correspondent à deux groupes distincts du réseau de distribution de chaleur et de froid. L'équipement bureautique et l'occupation de ces deux parties du bâtiment diffèrent significativement: la zone «est» s'est distinguée en 1993 par d'importants gains internes provenant d'un centre de calcul (puissance moyenne de 5,4 kW).

Du fait de sa nature massive (murs, enveloppe et dalle), le bâtiment est extrêmement inertiel sur le plan thermique (constante de temps évaluée à 155 heures), ce qui explique sa faible sensibilité aux variations des conditions météorologiques extérieures (principe du «bâtiment isotherme»). Le tableau 3 donne les principales caractéristiques de l'immeuble.

3. Description des installations techniques

Le bâtiment est équipé d'installations techniques permettant la production de chaleur et de froid, ainsi que leur distribution à différents niveaux. Le chauffage est principalement assuré par la chaleur récupérée sur des compresseurs à air de l'usine, un apport supplémentaire étant fourni par une chaudière à mazout en cas de nécessité. La production d'eau froide, nécessaire au rafraîchissement du bâtiment, est assurée par une tour hybride située sur son toit (évapo-convecteurs); l'eau y est rafraîchie par ventilation forcée (convection) et/ou par arrosage (évaporation). La figure 2 donne un aperçu de la situation de ces installations dans le bâtiment. La distribution de chaleur et de froid est assurée par une «dalle active», constituée d'un réseau

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Tableau 3 - Principales caractéristiques du bâtiment

Nombre d'occupants	40
Coefficient de pertes spécifiques globales (H_o)	840 W/K
Coefficient surfacique de déperditions thermiques des murs (k)	$k_m = 0,35$ W/m ² K
Indice énergétique chaleur (hiver 93/94)	140 MJ/m ² an
Indice énergétique électricité (hiver 93/94)	183 MJ/m ² an
Ensoleillement annuel	1126 Kwh/m ² an
Température extérieure moyenne	7,5°C

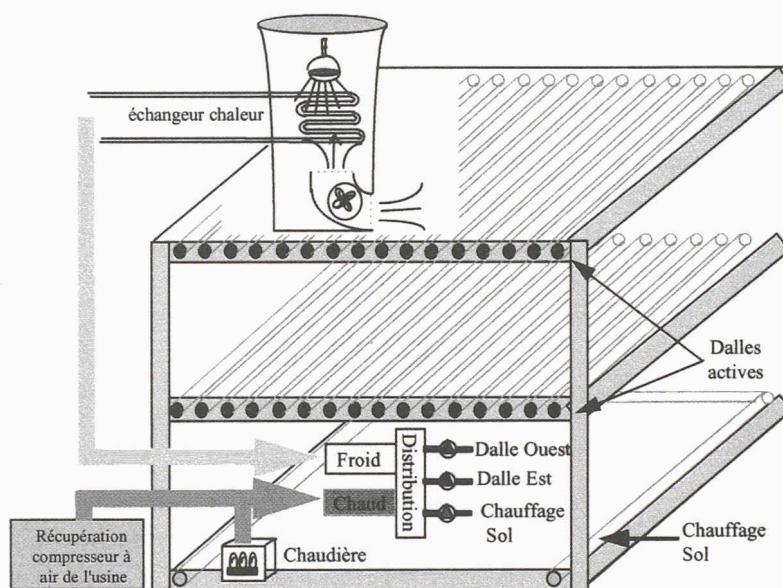


Fig. 2.- Réseau de distribution de chaleur et de froid du bâtiment

hydraulique noyé dans les dalles en béton supportant le 1^{er} étage (plafond du rez-de-chaussée) et la toiture (plafond du 1^{er} étage). Ce réseau est pourvu de deux groupes, correspondant aux deux parties distinctes du bâtiment :

- un groupe « est », caractérisé en 1993 par d'importants gains internes, dus principalement au centre de calcul ;
- un groupe « ouest », caractérisé par des gains internes modérés dus aux personnes, à l'éclairage et à la bureautique.

Deux circulateurs assurent la distribution de l'eau dans ces deux groupes (610 W à l'ouest et 410 W à l'est) ; ils fonctionnent en permanence toute l'année, afin d'homogénéiser la température intérieure de chacune des parties du bâtiment, et d'évacuer ou de répartir les apports de chaleur produits par les usagers et l'équipement (jusqu'à 10 kW dans la zone « ouest » en 1994). La température de l'eau oscille entre 17°C (minimum) et 24°C (maximum), en fonction de la consigne.

Un réseau de chauffage par le sol complète ce réseau de distribution. Celui-ci est situé sur le pourtour du rez-de-chaussée du bâtiment : il a pour but de réduire les pertes par le sol, le long de l'enve-

loppe, et assure le maintien en température du hall d'entrée.

L'utilisation d'une « dalle active » a été proposée par l'entreprise Geilinger, à des fins d'économie d'énergie et pour améliorer le confort thermique des usagers. La circulation de l'eau dans la dalle permet de répartir les gains gratuits et solaires dans l'ensemble du bâtiment. La « dalle active » fonctionne aussi comme un réservoir thermique, qui atténue les variations de température en été, comme en hiver (principe du bâtiment « isotherme »).

Le taux de renouvellement d'air, dû aux infiltrations et aux ouvertures de fenêtres, est particulièrement faible en hiver : il a été évalué à 0,15 renouvellement par heure. Le bâtiment est cependant équipé de deux ventilations mécaniques, fonctionnant durant les heures de bureau :

- l'une est destinée aux locaux sanitaires (débit de 800 m³/h),
- l'autre, pourvue d'un récupérateur de chaleur (70 % de rendement), est destinée aux autres locaux (débit de 1700 m³/h).

Lorsque la ventilation mécanique est en fonction, le taux de renouvellement d'air global du bâtiment atteint 0,55 renouvellement par heure.

Quatre régulateurs numériques programmables gèrent les installations techniques suivantes du bâtiment :

- ventilation,
- tour hybride,
- dalle active « est » et « ouest »,
- chauffage par le sol.

De type traditionnel, la stratégie adoptée pour la régulation des « dalles actives » présente certains avantages par rapport aux solutions généralement utilisées dans la pratique. Les consignes de température asservissent, en effet, la température de retour de l'eau du circuit hydraulique à la température de l'air extérieur, en lieu et place de la température d'aller. Une prise en compte partielle des gains internes est ainsi réalisée par ce biais ; une fraction de ces apports est « absorbée » par la « dalle active », du fait de sa température relativement faible (22°C). Bien que la régulation conventionnelle n'effectue aucune prévision de ces gains, ses performances sont susceptibles d'être supérieures à celle d'un régulateur asservissant la température d'aller (stratégie usuelle de régulation) : on peut ainsi raisonnablement s'attendre à ce que lesdites performances se rapprochent de celles de la régulation prévisionnelle et rendent plus difficile la mise en évidence d'un meilleur fonctionnement de cette dernière.

Les consignes de la régulation prévisionnelle ont été ajustées, dans un premier temps, à celles de la régulation conventionnelle. Celles-ci ont été choisies de manière à ce que la température intérieure moyenne des locaux soit identique pour les deux modes de régulation, en l'absence de gains solaires (ciel couvert) et pour de faibles gains internes (période nocturne).

4. Régulation prévisionnelle

Le principe de fonctionnement de la régulation prévisionnelle consiste à optimiser les apports de chaleur et de froid dans le bâtiment, sur un horizon de temps déterminé (24 heures), en tenant

Pour les gains internes, un modèle déterministe a par contre été utilisé, afin de ne pas accroître la complexité des algorithmes et le temps de calcul. Il a été développé séparément pour les parties « est » et « ouest » du bâtiment sur la base des éléments suivants :

- suivi horaire de la consommation électrique globale du bâtiment (fig. 4),
- relevés ponctuels de consommation des principaux équipements du bâtiment (tour hybride, climatisation du local informatique, centre informatique, circulateurs, etc),
- recensement des appareils de bureautique et d'éclairage (emplacement, consommation électrique et durée de fonctionnement),
- enquête relative à l'occupation des locaux (horaire de travail).

L'algorithme de régulation prévisionnelle a été implanté sur un PC 486 IBM compatible (33 MHz, 4 MB RAM). Le programme, écrit en *Quick Basic*, se limite aux 640 Kb de mémoire vive disponible sous le système MS DOS.

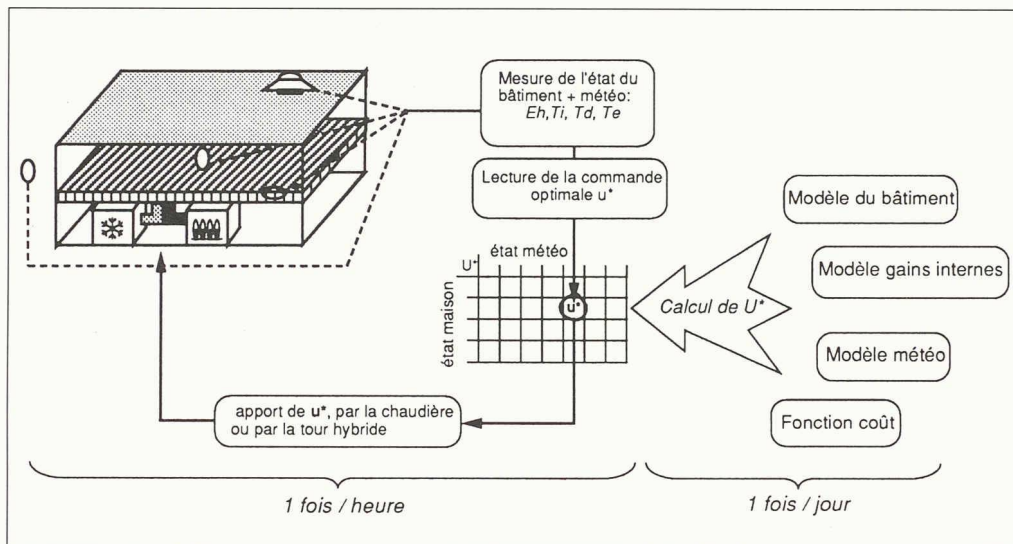


Fig. 3. - Composants, opérations principales et fonctionnement du régulateur prévisionnel

compte des grandeurs aléatoires qui influencent le comportement des installations techniques (grandeurs météorologiques, gains internes). Deux opérations distinctes sont réalisées au cours du temps : d'une part, une matrice de commande optimale est calculée au début de chaque période d'optimisation, c'est à dire à minuit pour une durée de 24 heures ; d'autre part, une commande optimale est lue toutes les heures dans cette matrice et exécutée dans le but de gérer les installations techniques (fig. 3). Le pointeur de cette matrice est déterminé à l'aide des grandeurs mesurées suivantes :

- variables météorologiques (rayonnement solaire et température extérieure) ;
- état thermique du bâtiment (température de l'air intérieur et des parties massives) ;
- moment de la journée (heure).

Un modèle nodal du bâtiment permet de déterminer son comportement dynamique en prenant en compte son état thermique actuel, ainsi que l'évolution probable des grandeurs météorologiques et des gains internes. Grâce à ce modèle et à une fonction coût, définie à partir de grandeurs énergétiques et de grandeurs dépendant du confort thermique, une stratégie de régulation, optimisant le con-

fort et réduisant la consommation, peut être déterminée.

Le rayonnement solaire et la température extérieure ont, par ailleurs, été identifiés comme les variables météorologiques dominantes susceptibles d'influencer le comportement dynamique d'un bâtiment. Un modèle stochastique de ces deux grandeurs météorologiques a été élaboré à partir de données météorologiques horai-

Puissance [kW]

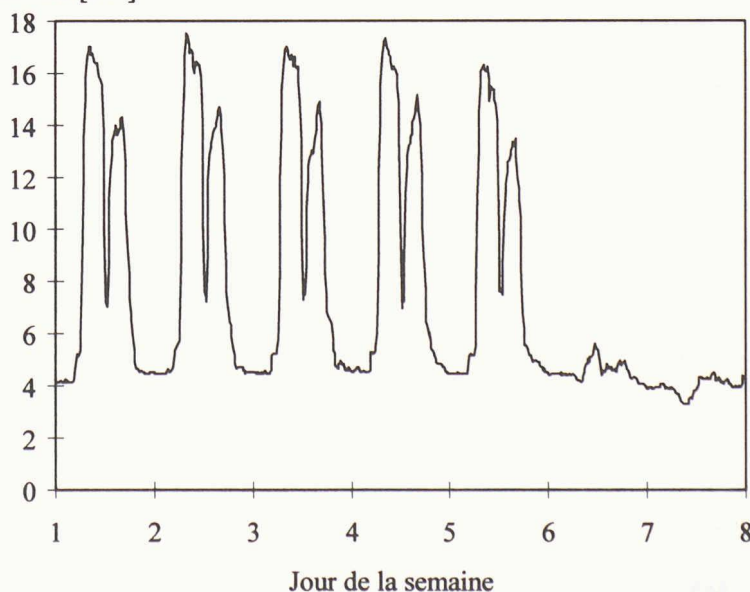


Fig. 4. - Profil moyen de la consommation électrique, obtenu en 1994 sur la saison de chauffage, à partir du suivi expérimental (période du 1^{er} janvier au 30 avril et du 1^{er} octobre au 31 décembre 1994)

Pour s'approcher au mieux des conditions pratiques de mise en œuvre d'un produit industriel, la stratégie générale suivante a été adoptée :

- le nombre de capteurs nécessaire à la régulation a été réduit au strict minimum (réduction des coûts d'installation);
- des capteurs de coût modéré ont été utilisés (réduction du prix de revient).

La régulation prévisionnelle nécessite finalement la mesure de cinq grandeurs : les températures de l'air intérieur et extérieur, la température de la dalle active, le rayonnement solaire, ainsi que les apports de chaleur ou de froid à la dalle active.

5. Résultats expérimentaux

Des mesures ont été effectuées sur le bâtiment de mai 1993 à décembre 1994. Le mode de régulation des deux zones du bâtiment a été régulièrement alterné (en principe tous les quinze jours), pour permettre la comparaison des régulateurs : une partie du bâtiment est alors en mode prévisionnel, l'autre en conventionnel.

Le but du projet est de quantifier rigoureusement les différences de consommation énergétique entre les deux types de régulateur. Une comparaison directe étant impossible (orientation et mode d'occupation des deux parties du bâtiment différents), une méthode d'analyse originale a été développée ; elle permet de prendre en compte deux particularités du bâtiment :

- la part importante des gains internes et solaires aux besoins de chauffage (supérieure à 35 %);
- le fonctionnement de la « dalle active » qui, selon les conditions météorologiques (mi-saison) dans le cas d'une régulation conventionnelle, peut chauffer et refroidir le bâtiment durant une même journée.

Des droites de corrélation ont été déterminées, pour chaque partie du bâtiment, en mode conventionnel et prévisionnel. Ces droites

caractéristiques sont représentatives du comportement énergétique du bâtiment et des installations techniques sur l'ensemble des saisons de chauffage et de rafraîchissement. Une estimation raisonnable de la consommation énergétique est alors obtenue à partir des mesures météorologiques (ensoleillement et température extérieure) et d'une consommation virtuelle déterminée à l'aide des droites de corrélation.

La comparaison des performances a été effectuée chaque année sur deux périodes distinctes : la saison hivernale habituelle (octobre à avril) et son complément (mai à septembre).

Les économies d'énergie relatives réalisées par la régulation prévisionnelle par rapport à la régulation conventionnelle sont données au tableau 4. Celles-ci s'expliquent principalement :

- par l'utilisation plus efficace des apports gratuits en période de chauffage et durant la mi-saison (anticipation des gains solaires);
- par la gestion plus efficace des apports de chaleur et de froid durant la mi-saison et en période de rafraîchissement (évaluation des apports réalisée sur un horizon de temps, et non instantanée).

L'analyse du confort thermique a été menée à bien, dans les deux zones du bâtiment, par des questionnaires régulièrement remplis par des occupants, ainsi que par l'intermédiaire du suivi expérimental des températures des locaux (température de l'air, tempéra-

tures de surface des planchers et plafonds). Cette analyse a montré que, dans la pratique, des conditions de confort thermique optimales sont maintenues par les deux régulations (moins de 10 % d'insatisfaits).

6. Conclusion

Une régulation prévisionnelle, basée sur le principe du contrôle stochastique optimal, a été développée et installée dans un bâtiment administratif à Delémont. Elle prend en compte l'inertie du système de distribution de chaleur et de froid, la variation des gains internes, ainsi que la nature aléatoire de l'ensoleillement. Le bâtiment bénéficie de techniques d'isolation de haut niveau ($k_{vitres} = 0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$) et est équipé d'une « dalle active » pour son chauffage et son rafraîchissement. Il se distingue par des gains internes significatifs, dus à l'équipement en bureautique, à l'éclairage et aux occupants.

Les mesures, effectuées de mai 1993 à décembre 1994, montrent que cette régulation gère plus efficacement les gains gratuits (apports solaires et internes) qu'un système conventionnel de conception avancée (consigne donnée sur le retour du réseau hydraulique). La régulation prévisionnelle, en optimisant en particulier les apports de chaleur sur un horizon de 24 heures, a permis de réaliser des économies d'énergie atteignant en moyenne 15 % sur la saison d'hiver (octobre à avril) et 16 % sur la saison d'été (mai à septembre). L'analyse du confort thermique, effectuée à l'aide de questionnaires

Tableau 4 - Economies relatives d'énergie de la régulation prévisionnelle (à mêmes prestations de confort thermique et mêmes conditions d'exploitation du bâtiment)

Périodes	Zone « ouest »	Zone « est »
Année 93	14 %	17 %
<i>hiver</i>	10 %	19 %
<i>été</i>	31 %	12 %
Année 94	20 %	10 %
<i>hiver</i>	24 %	6 %
<i>été</i>	3 %	17 %

remis aux occupants et par un suivi expérimental des températures du bâtiment, a permis de montrer que les deux régulations offraient un excellent niveau de confort.

La robustesse, ainsi que l'étendue du champ d'application de la régulation prévisionnelle, se trouvent donc confirmées par ces résultats. Même si une attention particulière a été accordée dans ce travail à la réduction du prix de revient, ainsi qu'à la simplification des composants de la régulation prévisionnelle, un effort important demeure à faire en vue d'éviter des frais de mise en service excessifs, justifiés par la nouveauté et la relative complexité de cette approche. Afin de mener à terme de façon efficace ces développements, une collaboration avec un partenaire industriel est en cours. Des voies de recherche prometteuses (logique floue, réseau de neurones) semblent, par ailleurs, se dessiner. Elles doivent permettre d'automatiser une partie de la mise en service du régulateur (identification des paramètres thermo-physiques du bâtiment) et de simplifier considérablement l'implémentation d'une régulation prévisionnelle dans la pratique.

Bibliographie

- [1] D. BERTSEKAS: « Dynamic programming and stochastic control », Academic press, New York, USA, 1976
- [2] BOCHUD F., SCARTEZZINI J.-L., NYGARD M.: « Compression of multi-year meteorological data », LESO, EPFL, Lausanne, 1990
- [3] M. NYGARD-FERGUSON: « Predictive thermal control of building systems », thèse N° 876, dépt. de physique, EPFL, Lausanne, 1990
- [4] M. NYGARD-FERGUSON, J.-L. SCARTEZZINI: « Evaluation of an optimal stochastic controller in a full-scale experiment », *Energy and Buildings* 18, 1-10, 1992
- [5] Y. OESTREICHER, M. BAUER, J.-L. SCARTEZZINI: « Prise en compte de gains internes dans un bâtiment administratif par une régulation prévisionnelle », Proc. de CISBAT'93, pp. 117-122, Lausanne, 1993
- [6] Y. OESTREICHER, M. BAUER, J.-L. SCARTEZZINI: « Performances in-situ d'un régulateur prévisionnel: chauffage et rafraîchissement d'un bâtiment administratif », Proc. vom 8. Schweizerischen Status-Seminar Energieforschung im Hochbau, pp. 259-262, 15-16 sept. 1994, Zurich
- [7] J.-L. SCARTEZZINI, R. FRITSCH, A. KOHLER, M. NYGARD-FERGUSON: « Etude stochastique du comportement de l'occupant », rapport final, Projet NEFF 339.5, 50 p., LESO-PB/EPFL, 1990
- [8] J.-L. SCARTEZZINI, F. BOCHUD AND M. NYGARD-FERGUSON: « Applying stochastic methods to building thermal design and control », Projet NEFF 349, EPFL, 1991
- [9] J.-L. SCARTEZZINI, M. BAUER ET Y. OESTREICHER: « Régulation prévisionnelle appliquée à une installation solaire active », publication CUEPE N° 60, Université de Genève, 1994
- [10] J.-L. SCARTEZZINI, Y. OESTREICHER ET M. BAUER: « Performances d'un régulateur prévisionnel dans un bâtiment commercial », Série CUEPE No 63, Université de Genève, 1995
- [11] R. WEBER: « La régulation de chauffage prévisionnelle », *Journal suisse des maîtres ferblantiers et appareilleurs*, 18/1993