

# Delta, un contrôleur de stores intelligent à logique floue

Autor(en): **Morel, Nicolas / Bauer, Manuel / Geinginger, Joachim**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **123 (1997)**

Heft 10

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79115>

## **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.

# DELTA, un contrôleur de stores intelligent à logique floue

Par Nicolas Morel et Manuel Bauer, LESO-PB/EPFL, 1015 Lausanne Joachim Geinginger et Günther Sejkora, Zumtobel Licht, A-6851 Dornbirn Walter Hegetschweiler Landis & Gyr Building Control, 6301 Zug Peter Wurmsdobler Technical University of Vienna, A-1040 Vienne

Dans cet article, nous décrivons un système de réglage de la position d'un store, qui tient compte à la fois de la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement, de l'éclairage naturel, et des vœux des utilisateurs. Ce prototype – dont les règles de fonctionnement font appel à la logique floue – a été étudié dans le cadre d'une expérience réalisée au LESO-PB/EPFL (Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne) et financée principalement par l'OFEN (Office fédéral de l'énergie), en collaboration avec plusieurs industries de la branche (Zumtobel Licht, éclairage artificiel et naturel, et Landis & Gyr, systèmes de réglage des installations techniques du bâtiment). Les vérifications expérimentales ont été effectuées à la fois sur le bâtiment du LESO-PB [1]<sup>1</sup> et par simulation informatique.

## 1. Introduction

Le système de réglage proposé dans le cadre du projet DELTA tient compte des principes suivants :

- optimisation de l'utilisation de la lumière naturelle ;
- optimisation du confort thermique (par exemple, éviter les surchauffes dues aux gains solaires) ;
- minimisation de la consommation énergétique (éclairage artificiel, chauffage, refroidissement) ;
- priorité donnée aux désirs de l'utilisateur.

Une description plus détaillée de l'expérience et de l'ensemble des résultats peut être consultée dans le rapport final du projet [2].

### 1.1 Intérêt scientifique et technique

La régulation de la position d'un store est un problème complexe, qui n'a pas encore vraiment trouvé de solution complètement satisfaisante. La plupart des systèmes uti-

lisés dans la pratique ne tiennent pas compte de l'ensemble des facteurs significatifs et souvent irritent les utilisateurs du fait de mouvements trop fréquents et d'une stratégie pas entièrement satisfaisante. Il est alors fréquent de trouver le système de contrôle mis hors service, les stores étant bloqués en permanence dans une position non optimale (par exemple, complètement baissés, même s'il n'y a personne dans la pièce et que des gains solaires directs permettraient d'abaisser les besoins de chauffage en hiver, ou complètement relevés, avec les risques de surchauffe estivale qui en découlent). L'emploi d'un algorithme utilisant la logique floue représente une intéressante possibilité de prendre en compte l'ensemble des paramètres en jeu, tout en laissant à l'utilisateur la liberté de régler lui-même la position de son store. De plus, l'algorithme développé ici présente la particularité d'être aisément intégrable à l'ensemble des systèmes de contrôle des installations techniques.

### 1.2 Intérêt économique

L'utilisation d'un algorithme « intelligent » pour le contrôle de la position des stores peut permettre une économie d'énergie significative.

Dans le cas de bâtiments administratifs, pour lesquels il est de plus en plus fréquent d'avoir un système de contrôle intégré avec de nombreuses sondes mesurant en permanence les conditions régnant dans tout le bâtiment, le surcoût lié à l'installation d'un contrôleur de stores « intelligent » pourrait être relativement bas (de l'ordre de quelques milliers de francs). Si un tel système implanté dans un bâtiment de 1000 m<sup>2</sup> de plancher permet une économie de 50 MJ par m<sup>2</sup> de plancher par année (soit environ 1500 francs en comptant un coût de l'énergie égal à 10 centimes par kWh), le temps de retour de l'investissement est suffisamment bas pour être financièrement intéressant.

## 2. Problématique et algorithme proposé

Un store joue au moins trois rôles distincts :

- gestion de l'éclairage naturel (protection contre l'éblouissement, réalisation d'une ambiance visuelle confortable) ;
- gestion des gains solaires (utilisation des gains solaires en hiver, protection contre les gains solaires estivaux) ;
- confort visuel (séparation entre l'intérieur et l'extérieur, accroissement de l'intimité).

Nous n'évoquons ici que les deux premiers aspects. De nombreuses études ont été menées au LESO-PB sur l'usage optimal des stores en fonction de l'aspect thermique (minimisation de la consommation de chauffage et/ou de refroidissement, maximisation du confort thermique) et on pourra par exemple consulter la référence [3]. Toutefois, ces études ne tiennent en général pas compte de l'interaction entre éclairage et facteurs thermiques, ni du comportement réel de l'utilisateur moyen.

### 2.1 Algorithme thermique

Le système de réglage d'un store doit adopter un comportement très différent en hiver ou en été. Durant la saison de chauffage, le système devra tenter d'utiliser au maximum les gains solaires passifs par les fenêtres (sauf en cas de surchauffe, qui peut survenir même en hiver, si la surface de fenêtres est importante, le bâtiment bien isolé, et les gains internes substantiels). Si possible, les stores doivent être abaissés durant la nuit, afin de diminuer les pertes thermiques à travers les fenêtres.

Au contraire, durant l'été, les gains solaires passifs doivent être minimisés, afin d'éviter les surchauffes. Durant la nuit, les stores devraient être relevés (et si possible, les fenêtres laissées ouvertes), afin d'évacuer un maximum d'énergie thermique. Une transition progressive entre les deux comportements extrêmes

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient aux références en fin d'article.



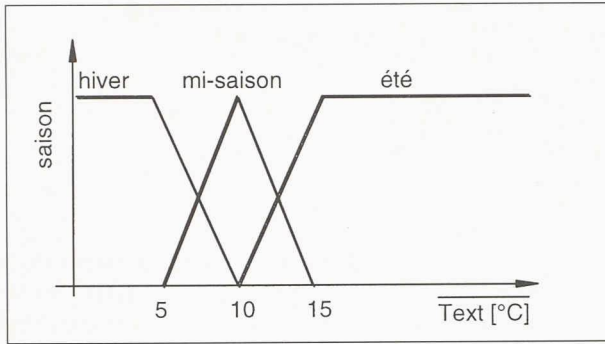


Fig. 1. - Fonctions d'appartenance pour la variable floue « saison »

devra avoir lieu durant la mi-saison.

2.1.1 Un modèle thermique simple pour l'ensemble fenêtre + store

Le bilan thermique statique pour l'ensemble fenêtre + store peut être représenté par l'équation ci-dessous (par m<sup>2</sup> de fenêtre; le premier terme représente les gains solaires à travers la partie du vitrage non recouverte par le store, le deuxième correspond aux gains solaires à travers la partie recouverte par le store et le troisième, aux pertes thermiques):

$$Ps = G_v \cdot g \cdot \alpha + G_v \cdot g \cdot g_\alpha \cdot (1 - \alpha) + k'' \cdot (T_i - T_e) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

- avec:
- $k''$  [W/m<sup>2</sup>K] coefficient de pertes thermiques pour l'ensemble fenêtre + store:  
 $k'' = \alpha \cdot k + (1 - \alpha) \cdot k / (1 + R \cdot k)$
- $\alpha$  [-] position du store,  $0 \leq \alpha \leq 1$  ( $\alpha = 1$  store ouvert,  $\alpha = 0$  store fermé)
- $k$  [W/m<sup>2</sup>K] coefficient de pertes thermiques de la partie vitrée
- $G_v$  [W/m<sup>2</sup>] rayonnement solaire vertical (dans le plan du vitrage)
- $g$  [-] coefficient de transmission énergétique du vitrage
- $g_\alpha$  [-] coefficient de transmission énergétique du store
- $R$  [m<sup>2</sup>K/W] coefficient de résistance thermique du store

$Ps$  est le bilan thermique global du système fenêtre + store: si  $Ps > 0$ , les gains solaires sont plus élevés que les pertes thermiques (la fenêtre permet alors de chauffer la

pièce); si  $Ps < 0$ , la pièce est refroidie.

2.1.2 Principe de l'algorithme

L'idée de base consiste à considérer le bilan thermique de la fenêtre  $Ps$  comme la variable à contrôler, de façon analogue à un système de chauffage. La position du store  $\alpha$  sera alors évaluée à partir de la valeur souhaitée pour  $Ps$ . Le contrôleur devra donc réaliser les buts suivants:

- aider le système de chauffage/refroidissement grâce à un choix judicieux de la position du store  $\alpha$  (apporter un maximum de gains lorsque le chauffage est en fonction et, au contraire, minimiser les gains lorsqu'il est souhaitable de refroidir la pièce);
- assurer une optimisation à long terme des besoins nets de chauffage, en tenant compte de la dépendance saisonnière.

Cette approche présente les avantages suivants:

- elle évite un comportement contradictoire du système de réglage du store et de celui du chauffage/refroidissement;
- elle assure une adaptation automatique à n'importe quel contrôleur de chauffage/refroidissement, ainsi qu'à n'importe quel bâtiment (les seuls paramètres nécessaires sont les caractéristiques des vitrages et du store, aisément accessibles).

2.1.3 Recours à la logique floue

La logique floue permet d'introduire facilement des règles simples de fonctionnement correspondant aux principes énoncés ci-dessus (une discussion plus détaillée sur

les contrôleurs à logique floue peut être trouvée dans la référence [4]).

La première étape consiste à définir les variables floues utilisées. Nous donnerons ici uniquement comme exemple la variable « saison », les autres étant déterminées de façon similaire. La saison est donc définie en utilisant la moyenne sur 24 heures de la température extérieure (fig. 1). La logique floue permet une transition progressive entre les différentes saisons. Le centre de la fonction d'appartenance à l'ensemble flou « mi-saison » correspond à une estimation rapide de la température de non-chauffage du bâtiment considéré. Une étude de sensibilité effectuée par simulation a montré que, pour autant que cette température soit choisie de façon raisonnable, une variation de sa valeur de 2 ou 3°C n'avait qu'une influence négligeable sur les performances du régulateur.

Les autres variables floues qui doivent également être définies au moyen de leurs fonctions d'appartenance sont la puissance du système de chauffage/refroidissement (la variable « chauffage » est positive en cas de chauffage et négative en cas de refroidissement) et la valeur souhaitée pour le bilan thermique de l'ensemble vitrage + store ( $Ps$ , variable de sortie du contrôleur).

Il est alors possible d'élaborer une base de règles donnant la variable floue de sortie  $Ps$  en fonction des deux variables floues d'entrée « saison » et « chauffage » (tableau 1).

Tableau 1: base de règles pour le module thermique du contrôleur de position des stores

$Ps$	chauffage = négatif	chauffage = zéro	chauffage = positif
saison = hiver	Négatif (*)	positif	positif_élevé
saison = mi-saison	Négatif	positif_bas	positif
saison = été	Négatif	zéro ou négatif	positif_bas (*)

La variable tabulée  $Ps$  est le bilan thermique souhaité pour l'ensemble vitrage + store. Les cas notés (\*) ne devraient normalement pas se produire pour un système de chauffage / refroidissement efficace.



La valeur de  $P_s$  une fois évaluée au moyen de la base de règles et « dé-fuzzifiée »<sup>2</sup> au moyen de la technique standard *Min-Max*, la position du store la plus propre à assurer la valeur souhaitée pour  $P_s$  est calculée au moyen de l'équation inverse de l'équation (1),  $\alpha$  étant limité à l'intervalle physiquement significatif [0, 1].

### 2.2 Algorithme visuel

Au contraire de l'aspect thermique, les exigences liées à l'éclairage (naturel et artificiel) ne dépendent que peu de la saison. De plus, le réglage de l'éclairage naturel (via la position du store) et de l'éclairage artificiel (luminaires) peut être instantané, puisqu'il n'y a pas d'inertie en jeu.

Les stores sont utilisés pour protéger de l'éblouissement. Diverses stratégies plus ou moins complexes peuvent être considérées, depuis une évaluation continue du confort visuel jusqu'à la simple prise en compte de l'éclairage sur le plan de travail où se trouve l'utilisateur (exprimé en Lux, et mesuré par une sonde ou calculé par multiplication de l'éclairage extérieur par un « facteur de lumière du jour » incluant l'effet du store).

L'interaction entre le contrôle de la position du store et le réglage des luminaires est évidemment très étroite. Dans notre cas, une stratégie simple a été utilisée : l'éclairage artificiel est ajusté indépendamment, de façon à compenser si nécessaire le manque de lumière naturelle en fournissant la différence entre l'éclairage dû à la lumière naturelle (tenant compte de la position effective du store) et le niveau d'éclairage requis par l'utilisateur.

Un bon confort visuel peut être assuré aux conditions suivantes :

- *Eviter l'éblouissement.* Les indices de confort visuel proposés par la CIE [5] considèrent les contrastes de luminance dans le champ visuel de l'utilisateur. L'évaluation de tels indices par le système de contrôle étant difficile (complexité du calcul géométrique nécessaire), une approche simplifiée a été adoptée : afin d'éviter des contrastes trop élevés, il est en tout cas nécessaire d'éviter le rayonnement solaire direct. Les deux variables caractéristiques sont l'éclairage dû au rayonnement solaire incident et l'angle d'incidence de ce rayonnement par rapport à la fenêtre.
- *Assurer une ouverture minimale des stores.* Il apparaît dans la pratique que les usagers aiment conserver un contact visuel minimum avec l'extérieur. Cette exigence a été confirmée aussi bien par le questionnaire technique d'un grand bâtiment bancaire que par les expérimentateurs du LESO-PB.
- *S'il n'y a pas de risque d'éblouissement, laisser entrer un maximum de lumière naturelle.*
- *Minimiser la fréquence des mouvements inattendus du store* (distraction, dérangement des personnes au travail).

#### 2.2.1 Recours à la logique floue

Comme dans le cas de l'algorithme thermique, un algorithme utilisant la logique floue a été élaboré et testé. Les variables floues utilisées dans l'algorithme sont les suivantes :

- l'éclairage sur le plan de travail de l'utilisateur, dû au rayonnement solaire direct ;
- l'éclairage sur le plan de travail de l'utilisateur, dû au rayonnement solaire diffus ;
- l'angle d'incidence du rayonnement solaire par rapport au plan de la fenêtre.

La nécessité de séparer les deux composantes directe et diffuse du rayonnement solaire provient du fait que l'éclairage naturel dû au rayonnement diffus est perçu

assez différemment de celui dû au rayonnement direct. En particulier, dans le cas du rayonnement direct, il faut tenir compte de l'angle d'incidence, ce qui n'est pas le cas du rayonnement diffus, isotrope. Dans la plupart des cas, le rayonnement diffus ne conduit pas à un éblouissement, sauf dans le cas de rayonnement élevé (par exemple par brouillard très lumineux).

Comme dans le cas de l'aspect thermique, on définit les variables floues par leurs fonctions d'appartenance. Une base de règle peut être alors élaborée, en tenant compte des principes discutés précédemment (tableau 2).

### 2.3 Prise en compte des désirs des utilisateurs, intégration des divers aspects

De façon générale, l'utilisateur a la priorité lorsqu'il choisit une position du store au moyen des boutons-poussoirs. Ce n'est qu'après un certain temps (dans notre cas, environ trente minutes) que l'on peut considérer que le vœu exprimé pourrait éventuellement ne plus correspondre à la réalité, et redonner alors la main au système automatique (l'utilisateur ayant évidemment la liberté d'appuyer à nouveau sur les boutons-poussoirs pour remettre le store dans la position de son choix, auquel cas une nouvelle période d'attente de trente minutes redémarre).

En règle générale, les algorithmes thermique et visuel peuvent donner des consignes opposées. Par exemple, durant l'hiver, les gains solaires peuvent être les bienvenus mais la lumière naturelle trop élevée (conduisant donc à un éblouissement), si le store est complètement ouvert. Les principes permettant la combinaison des trois aspects (vœux de l'utilisateur, thermique, visuel) peuvent être énoncés de façon simple :

- *l'utilisateur peut toujours choisir la position du store, à n'importe quel moment ; son désir reste prioritaire durant une période fixée (techniquement, seules les*

<sup>2</sup> Soit reconvertie en logique classique (ou déterministe). Les termes tels que « fuzzifier » (convertir en logique floue), « défuzzifier » ou « fuzzification » viennent de l'anglais « fuzzy logic » pour logique floue.



Tableau 2: base de règles pour le confort visuel ( $\alpha$  est l'angle d'incidence par rapport au vitrage, *Edir* l'éclairement direct, et *Ediff* l'éclairement diffus). Le tableau donne la valeur de la position du store. 169

	<i>Ediff</i> = faible				<i>Ediff</i> = élevé			
	<i>Edir</i> = faible	<i>Edir</i> = moyen	<i>Edir</i> = élevé	<i>Edir</i> = très élevé	<i>Edir</i> = faible	<i>Edir</i> = moyen	<i>Edir</i> = élevé	<i>Edir</i> = très élevé
$\theta$ = faible (ray. perpendicul.)	ouvert	mi-fermé	fermé	fermé	mi-fermé	mi-fermé	fermé	Fermé
$\theta$ = moyen	ouvert	mi-ouvert	mi-fermé	mi-fermé	mi-fermé	mi-fermé	mi-fermé	mi-fermé
$\theta$ = élevé (ray. tangent)	ouvert	ouvert	ouvert	ouvert	mi-fermé	mi-fermé	mi-fermé	mi-fermé

contraintes liées à la sécurité ont une priorité supérieure, lorsque par exemple un vent violent impose que les stores soient relevés);

- le confort visuel a priorité sur les économies d'énergie lorsque les usagers sont présents dans le local; dans ces conditions, c'est la position déterminée par l'algorithme visuel qui est choisie;
- le confort visuel n'est nécessaire que lorsque les usagers sont présents; lorsqu'ils ne sont pas présents (ou plus exactement qu'ils sont absents du local durant plus de trente minutes), le système de réglage des stores vise alors à optimiser la consommation thermique (chauffage/refroidissement); dans ce cas, la position du store est celle déterminée par l'algorithme thermique;
- de plus, en mode automatique (dans tous les cas, sauf lorsque l'utilisateur modifie lui-même la position du store), seules quatre positions sont disponibles, ce qui réduit de façon drastique le nombre de déplacements inattendus des stores.

### 3. Vérification expérimentale

La vérification expérimentale a permis d'atteindre trois buts: valider le modèle thermique de simulation, vérifier le fonctionnement correct de l'algorithme de réglage (en corrigeant au passage les fautes de programmation!), et étudier l'impact du comportement de l'utilisateur sur le système de contrôle des stores. Seul le dernier aspect sera discuté ici. Les deux autres sont traités en détail dans [2].

#### 3.1 Dispositif expérimental

Les pièces faisant l'objet de l'expérimentation sont deux bureaux du bâtiment LESO, décrit en détail dans [1] ou [6]. Orientés vers le sud, ceux-ci présentent les caractéristiques essentielles suivantes: 15,6 m<sup>2</sup> de surface de plancher, 3,77 m<sup>2</sup> de surface vitrée (vitrage triple), construction lourde, isolation poussée de chaque unité vers l'extérieur et vers les autres unités du bâtiment (les deux bureaux constituent une unité du bâtiment). Cette architecture a été conçue pour l'expérimentation de façades solaires passives, les diverses unités (le bâtiment complet en compte neuf au total) permettant chacune l'expérimentation d'une façade différente. Les stores sont des stores textiles extérieurs, de qualité médiocre.

Une installation complexe, comportant trois PC compatibles IBM interconnectés, a été utilisée pour le contrôle et le monitoring des différentes grandeurs physiques. Elle est décrite en détail dans [2].

#### 3.2 Satisfaction des utilisateurs

La réponse des utilisateurs (qui gèrent le système suivant leurs souhaits, sans aucune contrainte) aux divers algorithmes de réglage testés a été analysée au moyen d'un questionnaire. Les résultats ont été utilisés pour corriger certains paramètres du régulateur. Les remarques émises par les utilisateurs peuvent être classées en deux catégories.

##### 3.2.1 Remarques ayant permis une amélioration de l'algorithme de contrôle

- Lorsque des nuages passent devant le soleil, le store bouge trop

souvent. Ce problème a été réglé en introduisant une constante de temps pour la remontée du store.

- De façon générale, le store bouge trop souvent. Une restriction drastique du nombre de positions possibles (quatre positions) a réduit la fréquence des mouvements à une valeur tout à fait acceptable.
- L'ambiance devrait être plus sombre pour le travail à l'écran d'ordinateur, et plus claire dans d'autres cas. L'algorithme de confort visuel délivre des conditions standard de confort. La base de règle doit être complétée de façon à introduire un déplacement vers des ambiances plus sombres ou plus claires, lorsque l'utilisateur le demande.
- L'utilisateur préférerait pouvoir conserver un contact visuel avec l'extérieur (plutôt que la position store complètement fermé). Le respect d'une ouverture minimale du store (dans notre cas, 15%) permet de pallier ce problème.

##### 3.2.2 Problèmes relatifs à une mauvaise compréhension du fonctionnement du contrôleur

Il est nécessaire d'informer l'utilisateur sur le fonctionnement du système: l'expérience montre qu'il accepte alors bien plus facilement certaines situations qui peuvent sembler non optimales mais qui le sont en réalité, lorsque l'on considère le long terme. Par exemple, certains utilisateurs s'étonnent de voir le système de contrôle abaisser systématiquement le store lorsqu'il n'y a personne dans la pièce,



durant l'été. Lorsqu'ils comprennent que ce comportement est destiné à éviter des surchauffes, ils l'acceptent volontiers, au vu de l'amélioration du confort thermique qui en résulte.

#### 4. Résultats de simulation

La simulation nous a permis une comparaison détaillée de plusieurs variantes de l'algorithme, en comparaison avec des situations usuelles lorsqu'aucun système automatique de contrôle n'est prévu. Les simulations, effectuées au moyen d'un programme de simulation nodal (au total 35 nœuds) écrit à l'aide du logiciel *Matlab*, ont couvert une année complète. Des comparaisons qualitatives (évolution de la position des stores et de la température intérieure pour des jourstypes) et quantitatives (consommation d'énergie sur l'année complète) ont été effectuées. Seuls les résultats quantitatifs sont présentés ici.

##### 4.1 Variantes étudiées

Deux catégories d'algorithmes ont été simulés.

A) Situations de « référence » avec un contrôle élémentaire du store :

- store toujours ouvert
- store toujours mi-ouvert
- store toujours fermé
- économie d'énergie de chauffage en hiver (store fermé la nuit et ouvert le jour)
- économie d'énergie de refroidissement en été (store ouvert la nuit et fermé le jour)
- « utilisateur économe en énergie » (durant l'hiver, store fermé la nuit et ouvert le jour; durant l'été, store ouvert la nuit et fermé le jour)

B) Algorithmes automatiques de contrôle de la position du store :

- algorithme « DELTA énergétique » (optimum énergétique en permanence, comme si la pièce était toujours inoccupée)
- algorithme « DELTA visuel » (optimum visuel en permanence, comme si la pièce était toujours occupée)

- algorithme « DELTA standard » (combinaison optimum énergétique-optimum visuel, suivant un schéma standard d'occupation 8 h-18 h)

Les données météo utilisées pour la simulation ont été générées par le logiciel *Meteonorm 95* [7], pour l'emplacement considéré (Eculens/Lausanne).

##### 4.2 Consommation d'énergie

Les consommations d'énergie (chauffage, refroidissement et éclairage artificiel) sont représentées à la figure 2.

Les constatations suivantes peuvent être faites :

- en ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, l'algorithme de la variante « DELTA énergétique » est très efficace en comparaison avec les cas de référence ;
- lorsque le bâtiment est occupé, les utilisateurs ont besoin de confort visuel dans les pièces. L'algorithme « DELTA standard » correspond à cette situation, en supposant que l'occupation des locaux a lieu de 8 h à 18 h. Des économies substantielles peuvent encore être faites en comparaison avec les stratégies à position fixe, et même par rapport à la stratégie « utilisateur efficace en énergie » ;
- en ce qui concerne l'énergie utilisée pour l'éclairage artificiel, l'algorithme « DELTA standard » donne un résultat très proche du cas où le store est ouvert en permanence (le cas le plus favorable du point de vue de l'éclairage naturel). La faible différence entre les deux cas correspond aux situations pour lesquelles l'éclairage artificiel a été utilisé malgré un store en partie abaissé, du fait des exigences de confort visuel (notamment éblouissement dû au rayonnement solaire direct) ;
- les deux stratégies DELTA prenant en compte un optimum énergétique de chauffage/refroidissement (DELTA énergétique et DELTA standard) montrent une

très bonne caractéristique énergétique globale. Elles sont bien meilleures que toutes les stratégies de référence, y compris la stratégie « utilisateur efficace en énergie », qui constitue pourtant une bonne variante en ce qui concerne l'économie d'énergie de chauffage/refroidissement ;

- la stratégie DELTA standard prend en compte l'optimum de confort visuel lorsque l'utilisateur est présent. Malgré ce compromis, qui dégrade quelque peu les performances thermiques, la consommation totale d'énergie n'est supérieure que de peu à la stratégie DELTA énergétique (2667 MJ au lieu de 2463 MJ).

#### 5. Conclusions

L'algorithme de contrôle automatique des stores présenté dans cet article est basé sur deux principes, mis en œuvre au moyen de bases de règle à logique floue très simples :

- le contrôle des gains solaires directs par la fenêtre pour aider au maximum le système de chauffage/refroidissement ; une optimisation à long terme est considérée, en tenant compte de la saison ;
- l'optimisation du confort visuel, lorsque l'utilisateur est présent dans la pièce.

Les principes de base utilisés dans l'algorithme proposé ont plusieurs avantages :

- une adaptation très facile à n'importe quelle installation de chauffage et de refroidissement ;
- les seules caractéristiques thermiques à connaître sont celles du vitrage ;
- le seul paramètre à ajuster est le seuil pour la « fuzzification »<sup>3</sup> de la variable « saison », qui correspond normalement à la « température de non-chauffage » du bâtiment.

Les enquêtes de satisfaction des utilisateurs ont montré qu'il est important de laisser ceux-ci régler

<sup>3</sup> Voir note 2.



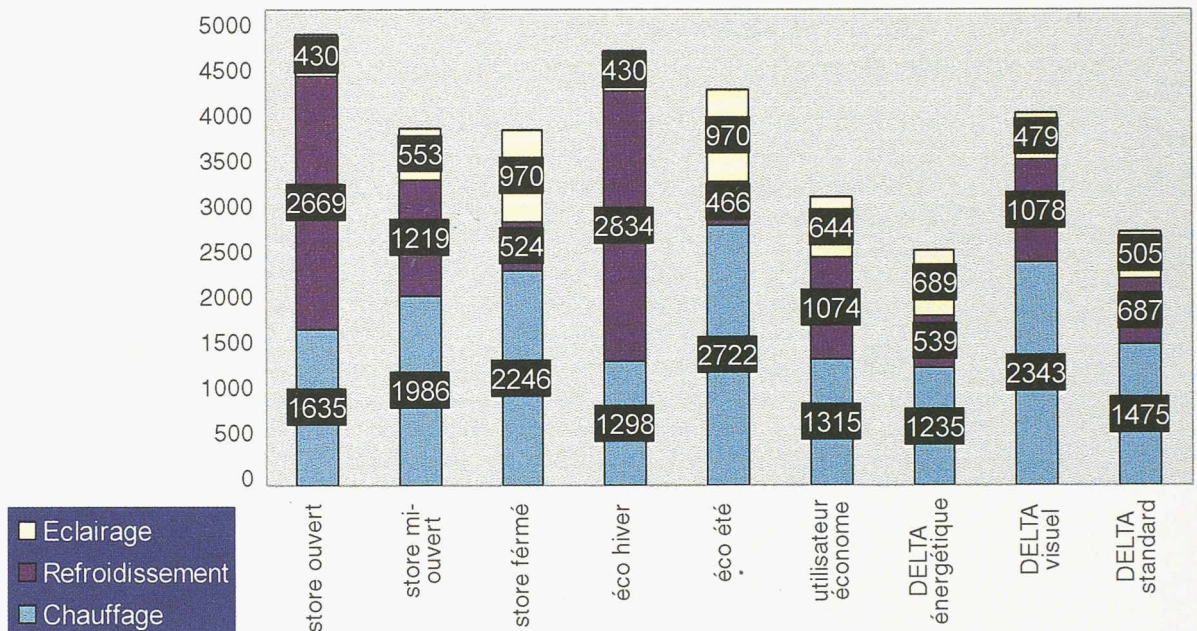


Fig. 2.- Demande annuelle d'énergie [MJ] pour diverses variantes de contrôle de store (surface de référence énergétique: 17,7 m<sup>2</sup> de plancher)

eux-mêmes la position du store, avec une priorité plus élevée que celle du système automatique. L'expérience a également montré une bonne acceptation du comportement du système.

### 5.1 Signification des résultats pour la pratique

Dans le projet DELTA, nous n'avons considéré que des bâtiments non-résidentiels (bureaux, écoles, musées, etc). Actuellement, il s'agit des seuls bâtiments équipés de stores contrôlables au moyen d'une commande électrique, et qui (de plus en plus fréquemment) comportent un câblage permettant d'interconnecter les divers systèmes de contrôle (chauffage, refroidissement, ventilation, éclairage artificiel, sécurité, notamment). Par ailleurs, il s'agit également des bâtiments dans lesquels il est le plus aisé d'économiser de grandes quantités d'énergie, grâce à l'utilisation d'algorithmes sophistiqués pour le contrôle des installations techniques.

A l'avenir, la proportion de tels bâtiments augmentera. Il sera donc

possible d'économiser une proportion importante de l'énergie consommée dans les bâtiments, sans diminuer en aucune manière le confort (thermique, visuel, qualité de l'air) des utilisateurs. Le marché pour des contrôleurs « intelligents » (algorithmes sophistiqués et auto-adaptation) et intégrés (considération du bâtiment comme un seul système réglé global) est donc appelé à croître de façon considérable. Les fabricants de systèmes de contrôle l'ont d'ailleurs bien compris: la participation de deux entreprises de taille importante au projet DELTA, et la prise, en commun entre tous les participants au projet, d'un brevet concernant l'algorithme développé, montre cet intérêt.

Le contrôleur développé ici a comme caractéristiques essentielles le fait d'être facile à installer et de raccourcir et améliorer la qualité de la mise en service. Les plaintes des utilisateurs se rapportant fréquemment à une mise en service insuffisante (ou même parfois « oubliée »), l'intérêt du système est évident.

### Références

- [1] « Dossier Systèmes, Rapport Technique », NEFF projects 110 and 110.1, LESO-PB/EPFL, mai 1985
- [2] M. BAUER, J. GEIGINGER, W. HEGTSCHWEILER, N. MOREL, G. SEJKORA, P. WURMSDOBLER: « DELTA, A Blind Controller Using Fuzzy Logic », Final Report, LESO-PB/EPFL, août 1996
- [3] IEA Energy Conservation in Buildings, Annex 12, « Windows and Fenestration », Final Report for the Swiss Participation, J.B. GAY, T. FRANK, B. KELLER, LESO-PB/EPFL, 1987
- [4] H. BÜHLER: « Réglage par logique floue », Presses Polytechniques Romandes (1994)
- [5] « Discomfort Glare in the Interior Working Environment », CIE publication N° 55, Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, 1983
- [6] Laboratoire d'énergie solaire, bulletin N° 2, LESO-PB/EPFL, octobre 1981
- [7] *MeteoNorm 95*, version 2.0 User Manual, MeteoTest, Berne, 1996