

DELTA, UN CONTRÔLEUR DE STORES INTELLIGENT A LOGIQUE FLOUE

Nicolas MOREL, Manuel BAUER (LESO–PB/EPFL, CH–1015 Lausanne)
Joachim GEIGINGER, Günther SEJKORA (Zumtobel Licht, A–6851 Dornbirn)
Walter HEGETSCHWEILER (Landis & Gyr Building Control, CH–6301 Zug)
Peter WURMSDOBLER (Technical University of Vienna, A–1040 Wien)

RESUME

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 artificiel, et des vœux des utilisateurs. Ce prototype, qui utilise la "logique floue" pour décrire les règles de fonctionnement, a été étudié dans le cadre d'une expérience réalisée au LESO–PB/EPFL (Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne) et financée principalement par l'OFEN (Office fédéral suisse 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] et par simulation informatique.

Par rapport à diverses stratégies usuelles d'utilisation d'un store, l'emploi d'un algorithme du genre de celui présenté ici permet d'économiser entre 10 et 45 % de l'énergie totale consommée (chauffage + refroidissement + éclairage artificiel), tout en assurant un confort thermique et visuel identique ou meilleur.

ABSTRACT

We describe in this paper a system controlling the position of a blind. The algorithm takes into account heating and cooling energy demands, daylighting and artificial lighting, and user wishes. The prototype uses "fuzzy logic" in order to implement the rules. It has been studied in the framework of an experiment carried on at LESO–PB/EPFL (Solar Energy and Building Physics Laboratory). The project has been funded mainly by the OFEN/BEW (Swiss Federal Office of Energy), and has been the object of a collaboration with several companies specialised in control systems and lighting (Zumtobel Licht, daylighting and artificial lighting, and Landis & Gyr, control systems for building equipment). The experimentation has been done both on the LESO Building [1] and by computer simulation.

When compared with usual strategies for controlling the blind position, the algorithm we propose allows a saving between 10 and 45 % of the total energy use (heating + cooling + artificial lighting), with a thermal and visual comfort similar or better.

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].

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 utilisés 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 d'influence, 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.

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 d'installation d'un contrôleur de stores "intelligent" pourrait être relativement bas (par exemple quelques milliers de francs). Si un tel système, implanté dans un bâtiment de 1000 m² de plancher, permet une économie de 50 MJ/m² 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. PROBLEMATIQUE ET ALGORITHME PROPOSE

Un store joue au moins trois rôles distincts, dont seuls les deux premiers sont considérés ici:

- 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).

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 devra avoir lieu durant la mi-saison.

Principe de l'algorithme: le bilan thermique statique P_s pour l'ensemble fenêtre + store peut être représenté par une équation donnant les gains solaires et les pertes thermiques, en fonction des caractéristiques du vitrage, du rayonnement solaire et de la position du store α . Si $P_s > 0$, les gains solaires sont plus élevés que les pertes thermiques (la fenêtre permet alors de chauffer la pièce); si $P_s < 0$ la pièce est refroidie. 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 α 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 α (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).

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], et la description des variables et de la base de règles dans [2]). La valeur de Ps une fois évaluée au moyen de la base de règles, puis "défuzzifiée", la position du store la plus propre à assurer la valeur souhaitée pour Ps est calculée au moyen de l'équation inverse de l'équation donnant Ps, α 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'éclairement sur le plan de travail où se trouve l'utilisateur (exprimé en Lux, et mesuré par une sonde ou calculé par multiplication de l'éclairement 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'éclairement dû à la lumière naturelle (tenant compte de la position effective du store) et le niveau d'éclairement 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'éclairement 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 gestionnaire 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).

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'éclairement sur le plan de travail de l'utilisateur, dû au rayonnement solaire direct;
- l'éclairement 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.

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 30 minutes) que l'on peut considérer que le voeu 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 30 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 (voeux 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 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;
- au contraire, lorsqu'ils ne sont pas présents (ou plus exactement qu'ils sont absents du local durant plus de 30 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;
- enfin, en mode automatique (dans tous les cas, sauf lorsque l'utilisateur modifie lui-même la position du store), seules 4 positions sont disponibles, ce qui réduit de façon drastique le nombre de déplacements inattendus des stores.

3. VERIFICATION EXPERIMENTALE

La vérification expérimentale a permis d'atteindre trois buts: valider le modèle thermique de simulation, vérifier le fonctionnement correct de l'algorithme de réglage (et corriger les bugs de programmation !), et étudier l'impact du comportement de l'utilisateur sur le système de contrôle des stores. Faute de place, la discussion sur les résultats de la vérification expérimentale ne figure pas dans le présent papier. Les personnes intéressées peuvent se référer au rapport final complet [2].

Les pièces faisant l'objet de l'expérimentation sont deux bureaux du bâtiment LESO, décrit en détail dans [1] ou [6]. Les bureaux sont orientés vers le sud, et ont les caractéristiques essentielles suivantes: 15.6 m² de surface de plancher, 3.77 m² 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). 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].

4. RESULTATS 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 noeuds) 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 jours-types) et quantitatives (consommation d'énergie sur l'année complète) ont été effectuées. Seules les résultats quantitatifs sont présentés ici.

Deux catégories d'algorithmes ont été simulés:

A. Des 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 (Ecublens/Lausanne). Les consommations d'énergie (chauffage, refroidissement et éclairage artificiel) sont représentées sur la figure 1.

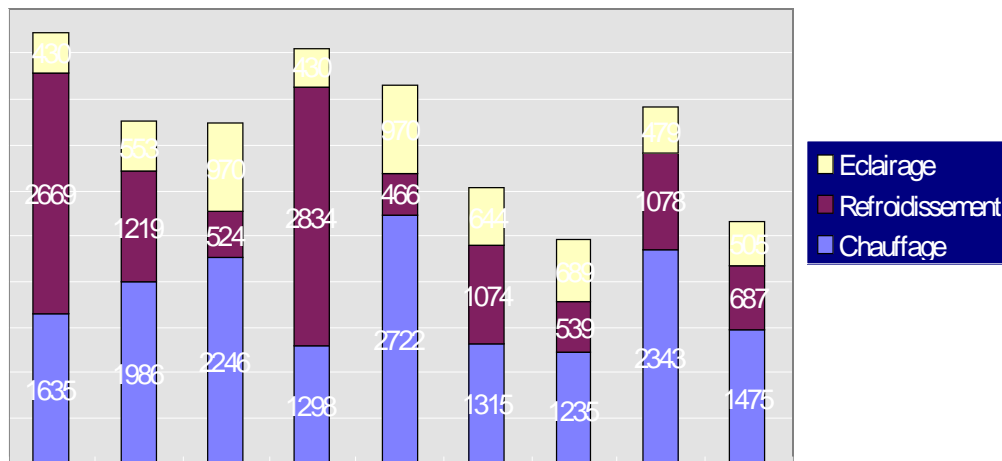


Figure 1: demande annuelle d'énergie [MJ] pour diverses variantes de contrôle de store (surface de référence énergétique: 17.7 m² de plancher).

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 fixes, 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).

6. CONCLUSIONS

L'algorithme de contrôle automatique des stores présenté dans cet article est basé sur deux principes, mis en oeuvre 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 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 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.

Grâce à des contrôleurs utilisant des algorithmes évolués, il est 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) croîtra donc 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.

REFERENCES

- [1] Dossier Systèmes, Rapport Technique, NEFF projects 110 and 110.1, LESO-PB/EPFL (Mai 1985)
- [2] M.Bauer, J.Geiginger, W.Hegetschweiler, 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: Régulation par logique floue, Presses Polytechniques Romandes (1994)
- [5] Discomfort Glare in the Interior Working Environment, CIE publication no 55, Commission Internationale de l'Eclairage, Paris (1983)
- [6] Laboratoire d'énergie solaire, bulletin no 2, LESO-PB/EPFL (October 1981)
- [7] MeteoNorm 95, version 2.0 User Manual, MeteoTest, Berne (1996)