

Optimisation du conditionnement d'air des locaux de télécommunication par utilisation de produits à changement de phase

David NÖRTERSCHÄUSER, Stéphane LE MASSON

France Telecom R&D, 2 Avenue Pierre Marzin, 22300 LANNION

Résumé - Cette étude a pour but la définition de règles de conception thermique de shelters afin de réduire la consommation électrique dévolue au conditionnement d'air. Pour atteindre cet objectif, un outil de simulation numérique a été développé. Un accent tout particulier a été porté sur la possibilité de prise en compte de matériaux à changement de phase.

Les simulations réalisées ont montré qu'en réduisant les apports externes à l'aide d'une isolation extérieure ainsi qu'en augmentant sensiblement l'inertie thermique par le biais de matériaux à changement de phase, il devient possible de dissiper des puissances d'équipement importantes sans production de froid.

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, $J/kg/^\circ C$	ρ	masse volumique, kg/m^3
k	conductivité thermique, $W/m/^\circ C$	<i>Indices et exposants</i>	
L	chaleur latente, J/kg	<i>int</i>	interne
T	température, $^\circ C$	<i>ext</i>	externe

1. Introduction

De nombreux petits bâtiments sont utilisés pour installer du matériel de télécommunications. Il peut s'agir de NRA-HD (Nœud de Raccordement d'Abonnés Haut Débit) ou de BTS (Base Transceiver Station).

Les puissances installées dans ces bâtiments tendent à croître et pour maintenir le matériel dans des conditions de température convenables, il est nécessaire de mettre en place des systèmes de conditionnement d'air. Les shelters lourds ou légers déployés actuellement ne possèdent pas d'inertie thermique et n'ont pas été étudiés thermiquement. Il en résulte des dépenses trop élevées en investissement et en fonctionnement au niveau du conditionnement d'air.

Cette étude a pour but la définition de règles de conception thermique de shelters afin de réduire la consommation électrique dévolue au conditionnement d'air. Ces règles de conception incluent :

- le choix des matériaux,
- leur agencement,
- la prise en compte et l'optimisation de méthodes de ventilation.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de disposer d'un outil de simulation numérique prédictif. La première partie de l'étude est donc consacrée au développement de cet outil. Un accent tout particulier a été porté sur la possibilité de prise en compte de matériaux à changement de phase (PCM), matériaux qui permettent d'augmenter significativement l'inertie thermique d'un bâtiment.

Ensuite, en partant d'une configuration de référence (type de bâtiment classique), des modifications ont été progressivement apportées et leur impact du point de vue thermique a

été étudié. En fonction des résultats obtenus, une conception de shelter associée à un système de conditionnement d'air optimisé est proposée.

2. Développement d'un modèle nodal pour la simulation thermique de bâtiments avec PCM

On se propose de développer un modèle numérique capable de représenter les phénomènes thermiques se déroulant au sein d'un bâtiment simple (typiquement, composé d'une pièce) incorporant ou non des matériaux à changement de phase (PCM) dans l'enveloppe.

Compte tenu de la complexité des phénomènes, il n'est pas réaliste de procéder à des expérimentations de laboratoire seules afin d'optimiser l'usage des PCM dans un local. Il n'est pas non plus réaliste de vouloir procéder à une résolution fine en utilisant des méthodes de discrétisation classiques car le temps de calcul serait rédhibitoire.

Un modèle nodal convient pour ce type d'application en raison du nombre réduit de nœuds du domaine physique.

Dans la mesure où les équations de base des modèles nodaux sont connues, le lecteur est invité à se référer aux ouvrages de référence [1].

2.1. Résolution du système d'équations

Pour être en mesure de représenter les phénomènes de changement de phase au sein des parois, l'adoption d'une méthode enthalpique est intéressante dans la mesure où il n'est pas nécessaire de suivre le front de changement de phase [2].

En effet, l'équation de la chaleur prise sous sa forme enthalpique reste valide dans tout le domaine physique.

La relation qui lie la température à l'enthalpie est la suivante:

$$H_m = C_{p_m} T_m \quad (1)$$

(La référence d'enthalpie est prise au zéro absolu. Toutes les températures sont exprimées en Kelvin)

Quelles que soient les types de paroi décrits (nombre de couches et matériaux), le système d'équations revêt la forme générique suivante:

$$[H]^{n+1} = [M]^{-1} \left([H]^n + [Q]^n * T_{ext} + [N][L][\alpha]^{n+1} + [P] \right) \quad (1)$$

Les vecteurs $[H]^{n+1}$ et $[H]^n$ représentent respectivement l'enthalpie aux instant n+1 et n. La matrice [M] est la matrice principale du système. Le vecteur [Q] regroupe les termes liés à la ventilation. Enfin, le vecteur L représente les chaleurs latentes de chaque volume du système (soit 0 si le matériau considéré n'est pas un matériau à changement de phase) et le vecteur $[\alpha]$ représente l'état (donc la phase) de chaque volume élémentaire.

A chaque pas de temps, il est nécessaire de déterminer l'enthalpie H à partir de valeurs qui sont connues, à l'exception du vecteur $[\alpha]$.

Il est donc nécessaire de recourir à une méthode itérative pour résoudre le système.

La méthode suivante est adoptée:

1. A chaque pas de temps, une valeur a priori du vecteur $[\alpha]$ est donnée (les valeurs α_i sont comprises en 0 et 1)
2. Une estimation $[H]_i^{n+1}$ de l'enthalpie est effectuée à partir de l'a priori.

$$[H]_i^{n+1} = [M]^{-1} \left([H]^n + [Q]^n * T_{ext} + [N][L][\alpha_{ini}]^{n+1} + [P] \right) \quad (2)$$

Les itérations sont ensuite poursuivies jusqu'au respect (à une valeur epsilon près) des contraintes suivantes):

Pour tout élément à changement de phase i du système, on forme une fonctionnelle R telle que:

$$R = \sum_i R(i) \quad (3)$$

$R(i) = (\alpha(i))^2$ si $H_i^{n+1} < Cp_i * T_{pc_i}$ (si le matériau est solide, la contrainte fait tendre $\alpha(i)$ vers 0 conformément à la relation qui lie température et enthalpie dans ce cas de figure).

$$R(i) = \left(|\alpha(i)| - \left(H_i^{n+1} - \frac{C_{p_i} * T_{pc_i}}{L_i} \right) \right)^2 \text{ si } H_i^{n+1} > Cp_i * T_{pc_i} + L_i \text{ (le matériau se trouve en cours$$

de changement de phase et la contrainte fait tendre $\alpha(i)$ vers $H_i^{n+1} - \frac{C_{p_i} * T_{pc_i}}{L_i}$ conformément à la relation qui lie température et enthalpie dans ce cas de figure).

$R(i) = (|\alpha(i)| - 1)^2$ (si le matériau est liquide, la contrainte fait tendre $\alpha(i)$ vers 1 conformément à la relation qui lie température et enthalpie dans ce cas de figure).

On cherche donc les solutions telles que $R = \sum_i R(i) = 0$.

L'ensemble a été programmé sous MATLAB en faisant appel à la fonction fminimax qui utilise une méthode séquentielle quadratique.

Lors d'études précédentes nous avons pu constater les limites des logiciels de CFD usuels qui résolvent de façon satisfaisante les problèmes de changement de phase mais seulement en l'absence de convection dans la phase liquide (ce qui est peu réaliste, sauf dans le cas de PCM micro-encapsulés) [3].

3. Recherche d'une conception optimale

Le protocole suivant est adopté pour la recherche d'une conception optimale.

Le principe de ventilation optimisée [4] dont le fonctionnement est décrit ci après (et a été intégré au modèle) sera considéré pour le conditionnement d'air des sites:

La ventilation doit pour se déclencher remplir les conditions suivantes:

- La température limite basse en interne notée TLB doit être supérieure à une valeur seuil (typiquement 19°C mais le seuil est généralement relevé en hiver pour limiter les déclenchements et ainsi économiser de l'énergie).

La différence de température $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$ doit être supérieure à une valeur seuil (typiquement $\Delta T_{min} = 2^{\circ}C$). Ensuite, le débit varie linéairement en fonction de ΔT , suivant la loi représentée ci-dessous.

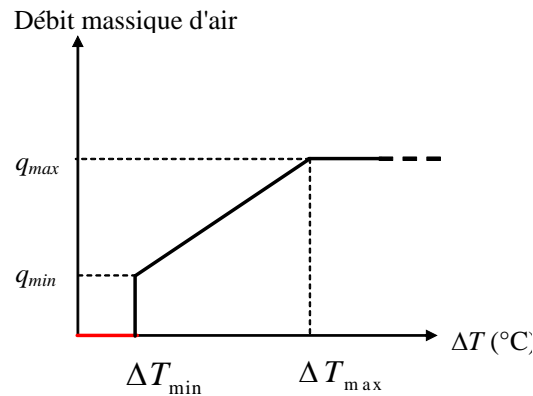


Figure 1: Loi de variation du débit d'air insufflé (et donc extrait) en fonction de la différence de température externe/interne]

Les lois de déclenchement de la ventilation optimisée en périodes estivales sont telles que le système se déclenche la nuit afin de refroidir la structure, tandis qu'il se coupe durant les heures chaudes de la journée. La maçonnerie se trouvant à une température plus basse et étant thermiquement inerte échange alors avec l'air, ce qui permet de limiter la température ambiante durant les pics de chaleur.

La température en interne ne doit pas dépasser $40^{\circ}C$ dans des conditions normales conformément aux spécifications de la norme ETSI EN 300 019-1-2 class 3.1 [5].

3.1. Système de référence

Les dimensions (en interne) du shelter qui servira de référence pour cette étude sont:
Longueur: 6 m, Largeur: 2,3 m Hauteur: 2,7 m

On prendra comme structure de référence des parpaings de 10 cm non enduits et une dalle de béton au sol d'épaisseur 10 cm ainsi qu'au plafond. Les propriétés de tous les matériaux mentionnés dans l'étude sont précisées dans le tableau suivant.

Les données extérieures utilisées pour les tests proviennent d'un épisode caniculaire relevé en août 2003 à Carpentras (Figure 2).

Matériau	Conductivité thermique	Chaleur spécifique	Masse volumique	Chaleur latente
Béton + PCM	1.75 W/m/°C	836 J/kg/°C	2450 kg/m ³	28700 J/kg (T _{cm} =30°C)
Parpaing	1.05 W/m/°C	648 J/kg/°C	1300 kg/m ³	0
Polystyrène extrudé	0.039 W/m/°C	1368 J/kg/°C	18 kg/m ³	0

Tableau 1: Propriétés thermophysiques des matériaux

Les températures calculées en interne (Figure 3) montrent qu'il est possible de dissiper une puissance maximale de 800W dans ce bâtiment de référence, sans production de froid, et sans dépasser la limite de $40^{\circ}C$ en ambiante.

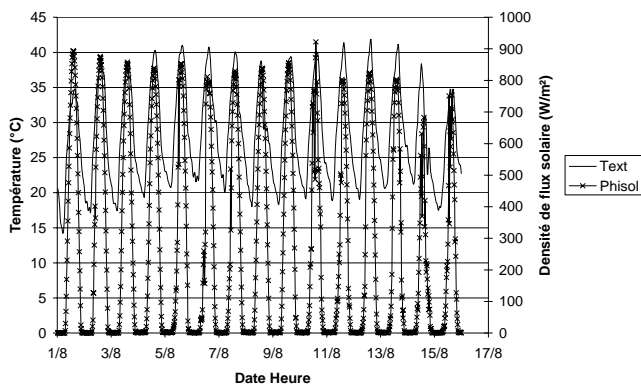


Figure 2: Données d'entrée

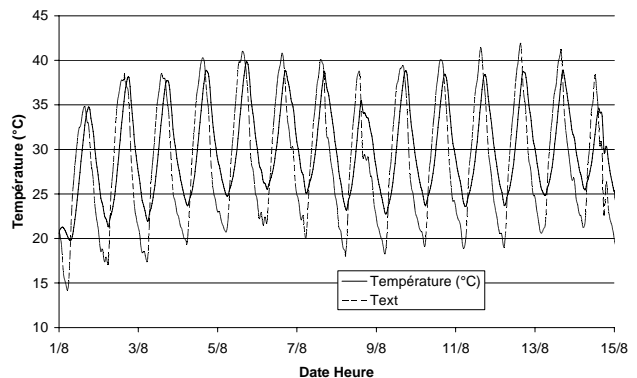


Figure 3: Température calculés avec $P1=800W$

3.2. Système de référence isolé de l'extérieur avec épaisseur de paroi doublée

Afin de réduire la contribution des apports externes, une isolation externe a été ajoutée (10 cm de polystyrène extrudé). Par ailleurs, afin d'augmenter l'inertie du système en vue de disposer de plus de "fraicheur" durant la journée, des parois d'épaisseur doublée (parpaings de 20 cm) sont considérées.

Les modifications ainsi apportées permettent de repousser significativement la puissance dissipable, soit 2200W (Figure 4). Par ailleurs, les variations de température en interne sont moindres du fait de la plus forte inertie.

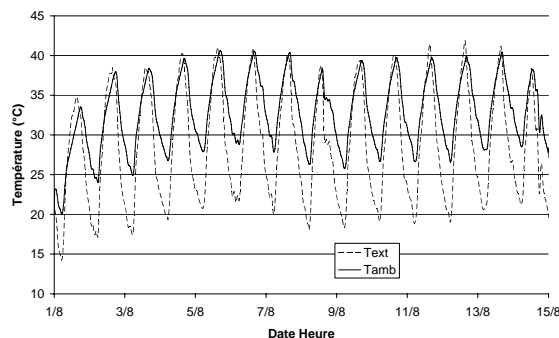


Figure 4: Température calculée avec isolation externe et $P2=2200W$

3.3. Utilisation de matériaux à changement de phase

La firme BASF a commercialisé en 2007 un produit à changement de phase micro-encapsulé nommé Micronal®. Il s'agit de microcapsules renfermant un produit de type cire changeant de phase à 23°C ou 26°C suivant le type retenu. La poudre ainsi formée est à incorporer directement à des mortiers (béton, enduit plâtre, etc.).

Microtek, une société américaine, propose par ailleurs des PCM micro-encapsulés avec le choix de la température de changement de phase entre 0°C et 50°C.

On se propose d'évaluer numériquement l'efficacité de tels produits en considérant du béton avec 1/3 (en volume) de PCM micro encapsulé. Faute de données disponibles, on supposera que la seule propriété thermophysique qui change suite à cette incorporation est la chaleur latente du béton résultant qui passe de $L=0$ (puisque le béton classique n'est pas un matériau à changement de phase) à $L=28700 J/kg$.

Le cas précédent a été repris en considérant non plus des parpaings de 20 cm mais 20 cm de béton banché additionné de PCM.

Les premières simulations ont été effectuées en considérant une température de changement de phase de 26°C.

L'abaissement de la température interne est très significatif durant la majeure partie de l'intervalle de simulation (Figure 5). Néanmoins, en certains points de la température de paroi, le cyclage de température n'est pas suffisant en fin de période pour repasser en phase solide. De ce fait, une température de changement de phase plus élevée serait plus appropriée.

La température de changement de phase a ensuite été augmentée numériquement à 30°C (d'après tous les tests effectués, il s'agit de la valeur optimale dans le cas présent). Cette fois, la limite de dissipation est significativement repoussée (Figure 6) puisque que l'on peut atteindre 4500W (toujours en ventilant les murs).

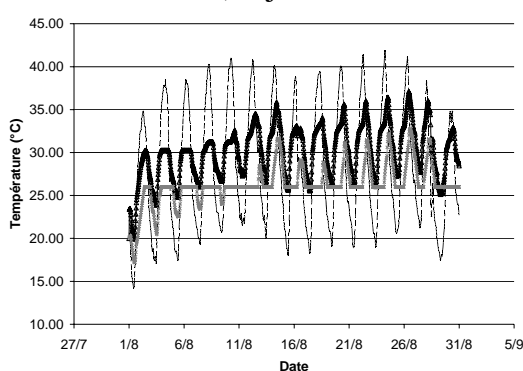


Figure 5: Simulations avec $T_{pc}=26^{\circ}\text{C}$

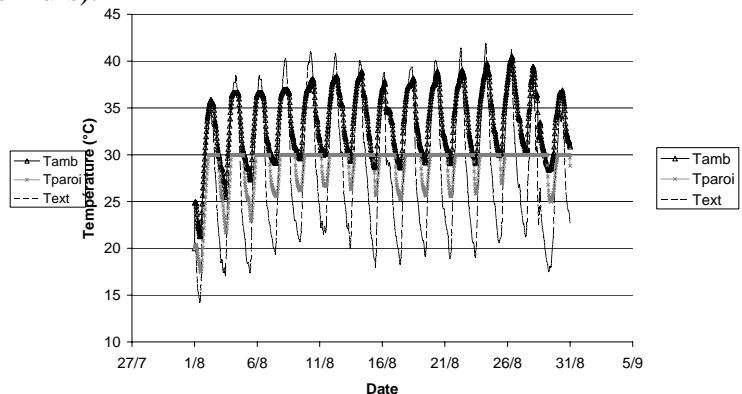


Figure 6: Simulations avec $T_{pc}=30^{\circ}\text{C}$

4. Conclusion

Une étude numérique a été réalisée afin de définir une conception optimisée de petits centres de télécommunications pour équipements actifs.

Les conceptions de shelter classiques ne présentent pas d'inertie thermique et ne permettent pas de tirer parti de la méthode de ventilation optimisée (méthode de conditionnement d'air sans production de froid).

Les simulations réalisées ont montré qu'en réduisant les apports externes à l'aide d'une isolation extérieure ainsi qu'en augmentant sensiblement l'inertie par le biais de matériaux à changement de phase, il devient possible de traiter des puissances d'équipements importantes sans production de froid.

Les perspectives sont de réaliser une étude expérimentale afin de confronter les résultats numériques.

Références

- [1] J-B. Saulnier et A. Alexandre, *Revue Générale de thermique*, 1985, vol. 24, no280, pp. 363-372.
- [2] N. Özisik, *Heat conduction*, Wiley Interscience, 1993.
- [3] D. Nörtershäuser & al, Application of molecular alloys as phase change materials for limiting the rise of temperature in telecommunication outdoor cabinets, *IHTC-13, Sydney 2006*.
- [4] S. Le Masson, Brevet d'invention, *Procédé d'évacuation de chaleur dégagée à l'intérieur d'un local, par ventilation à débit variable, et système de mise en œuvre*, N° d'enregistrement national: 02 09078
- [5] ETSI EN 300 019-1-2, Environmental Engineering (EE); *Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; Part 1-3: Classification of environmental conditions; Stationary use at weatherprotected locations*