RAFRAÎCHISSEMENT DE BÂTIMENTS PAR DÉPHASAGE THERMIQUE CONTRÔLÉ

P. Hollmuller; B. Lachal; J.-M. Zgraggen

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève, 7 rte de Drize, CH - 1227 Carouge

Résumé

Cette étude concerne la possibilité de déphaser l'oscillation thermique portée par un flux d'air, sans quasiment l'amortir. Après une mise en évidence théorique de ce phénomène novateur, nous présenterons le développement d'un prototype pour le déphasage de l'oscillation météorologique journalière, à des fin de rafraîchissement de bâtiments.

MISE EN ÉVIDENCE THÉORIQUE

Modèle de Schumann

Afin de caractériser le phénomène qui nous intéresse, nous ferons recours à un modèle d'échange thermique entre un flux d'air et un stock thermique (Fig. 1), défini par :

- Le débit d'air m_a , la section A et la fraction de vide η_s , qui fixent les vitesses à vide v_0 et interstitielle v.
- Le volume V_s et la surface d'échange S_s du matériau de stockage, qui fixent le contour p_s et l'épaisseur spécifique d_s des particules :

$$p_{s} = \frac{S_{s}}{L} \dot{m}_{a}$$
$$d_{s} = \frac{V_{s}}{S_{s}} = \frac{(1 - \eta_{s})A}{p_{s}}$$

- L'échange convectif air/stock *h*₀ ainsi que la capacité périodique de stockage *k*₀ sur la demi période :

$$k_0 = \omega c_s \rho_s d_s = \pi c_s \rho_s d_s \frac{\tau}{2}$$

Dans sa version la plus simple, les hypothèses suivantes sont par ailleurs retenues, permettant de décrire le système par un modèle à deux-phases (air et stock) :

- Le stock est composé de particules suffisamment fines pour que la température de chacune puisse être considérée homogène (pas de gradient de température intra-particule).
- L'enveloppe est totalement adiabatique et le flux d'air est réparti de façon uniforme sur la section du flux (pas de perte thermique vers l'extérieur et pas de gradient thermique transversal).
- La diffusion axiale entre les particules est négligeable par rapport aux échanges entre air et matière.

Modèle



Figure 1 : Schéma de principe.

Initialement proposé par Schummann [1], ce modèle à deux-phases est très largement cité ou utilisé dans la littérature pour une excitation « one-shot » (charge à température constante d'un stock initialement au repos), mais n'a encore jamais, à notre connaissance, été résolu ou analysé pour une excitation périodique, tel que proposé ici :

$$c_a \dot{m}_a \left(\frac{1}{v} \partial_t T_a + \partial_x T_a \right) + p_s h_0 (T_a - T_s) = 0$$
$$\frac{d_s}{2} c_s \rho_s \partial_t T_s + h_0 (T_s - T_a) = 0$$

avec :

$$T_a\big|_{x=0} = \theta_0 \cos(\omega t)$$

Solution

En régime établi, la solution fait apparaître un amortissement et un déphasage du signal :

$$T_{a} = \theta_{0} \exp\left(-\frac{S_{s}h}{c_{a}\dot{m}_{a}}\right) \cos\left(\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)-\frac{S_{s}k}{c_{a}\dot{m}_{a}}\right)$$

avec :

$$h = \frac{h_0 k_0^2}{h_0^2 + k_0^2}$$
 et $k = \frac{h_0^2 k_0}{h_0^2 + k_0^2}$

Relation transmission / déphasage

En définissant la transmission et le déphasage comme suit :

$$\varepsilon = \exp\left(-\frac{S_s h}{c_a \dot{m}_a}\right)$$
 et $\varphi = \frac{S_s k}{c_a \dot{m}_a}$

on a :

$$\varepsilon = \exp\left(-\frac{h}{k}\varphi\right) = \exp\left(-\frac{k_0}{h_0}\varphi\right)$$

Sous réserve des hypothèses ci-dessus, il devient donc possible de déphaser le signal périodique sans quasiment l'amortir, à condition d'un bon échange convectif et de particules de petite taille ($k_0 \ll h_0$).

Interprétation et règle du pouce

Les relations précédentes permettent d'établir la longueur nécessaire à un déphasage complet $(\varphi = \pi)$:

$$L_{\pi} = \left(1 + \frac{k_0^2}{h_0^2}\right) L_s$$

avec :

$$L_s = \frac{c_a \rho_a}{(1 - \eta_s)c_s \rho_s} L_0$$
$$L_0 = v_0 \frac{\tau}{2}$$

Le phénomène de déphasage à amortissement contrôlé s'interprète donc comme une dissociation entre vitesse de l'air (parcourant à vide la distance L_0 sur une demi-période) et vitesse de l'énergie thermique (parcourant grâce au stockage la distance L_s , à condition d'un échange convectif parfait). Cette interprétation corrobore évidemment la nécessité d'un bon échange convectif et de particules de fine taille (grande surface d'échange, faibles gradients internes).

Le Tableau 1 donne la longueur nécessaire au déphasage complet d'une onde journalière ou annuelle, pour une vitesse à vide de 500 m³/h par m² (0.14 m/s) et un rapport de chaleur spécifique volumique $c_s \rho_s / c_a \rho_a$ de 2000. Si l'on ajoute au volume de stockage la nécessité d'une isolation latérale suffisante à limiter les effets de bord, on réalise que le déphasage de l'oscillation annuelle, bien que séduisant, ne semble pas aisément réalisable. Par la suite nous nous limiterons donc au développement de prototypes pour le déphasage de l'oscillation journalière, essentiellement pour le rafraîchissement estival.

η_s		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$L_{s,24h}$	m	3.2	3.3	3.5	3.8	4.0	4.3	4.6	5.0	5.5	6.0
$L_{s,365j}$	km	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2

Tableau 1 : Longueur théorique de déphasage (échange convectif parfait).

Vitesse d'air (à vide) : 500 m³/h.m²; Rapport de chaleur spécifique volumique stock/air : 2000.

Phénomènes perturbateurs

Un ensemble de modèles plus élaborés permet de caractériser quelques effets perturbateurs non pris en compte par les hypothèses du modèle de Schumann. On trouvera ici les résultats principaux de ces calculs, dont les détails sont consignés dans le rapport de recherche [2] :

- Avec moins de 4% de perte sur la transmission, l'effet de la diffusion intraparticule reste faible si l'épaisseur spécifique *d_s* n'excède pas 20% de la profondeur de pénétration, propre au matériau de stockage et à la fréquence thermique considérée.
- Il en va de même pour la diffusion axiale : même pour un très bon échange convectif, on perdra moins de 5% de transmission si la longueur de pénétration axiale n'excède ellemême pas 5% de la longueur de déphasage

- L'enveloppe contribue non seulement à amortir un éventuel différentiel moyen avec la pièce, mais elle contribue également à l'amortissement de l'oscillation. Pour limiter ce phénomène il faut une épaisseur d'isolation supérieure à la profondeur de pénétration, propre au matériau d'isolation et à la fréquence thermique considérée. L'effet de bord résiduel devient alors négligeable dès que la surface d'échange de l'enveloppe ne représente plus que 1% de celle avec le matériau de stockage.
- Le frein potentiellement le plus important est lié à une éventuelle inhomogénéité du flux, à mettre en relation avec une inhomogénéité dans la géométrie. Bien que ce phénomène soit relativement complexe, une première tentative de modélisation indique des pertes de signal extrêmement importantes liées à ce phénomène.

DÉVELOPPEMENT DE PROTOTYPES

Description

Enveloppé de 20 cm de polystyrène expansé, le prototype testé en laboratoire consiste en un caisson de 1 m de longueur, pour $0.5 \ge 0.5$ m de section (auquel, pour le stockage en billes disponibles en quantité limitée, a ponctuellement été substitué un prototype de même longueur mais de $0.82 \ge 0.31$ m de section).



Figure 2 : Matériaux de stockage.

Les matériaux de stockage testés sont les suivants (Fig. 2) :

- Gravier de carrière (Holcim, Peney Genève) de différentes tailles (4/8, 8/16 et 16/32 mm, ainsi qu'un mix hétérogène allant approximativement de 4 à 32 mm), empilé en vrac ; Caractéristiques mesurées : 2'620 kg/m³, 0.86 kJ/K.kg. Fraction de vide : 0.35.
- Billes en terre de 10 et 30 mm de diamètre, fabriquées artisanalement (Billes et Traditions, Mirabel et Balcons, F), composées de ciment, d'argile et de chaux ; Empilement relativement régulier pour les grosses billes, en vrac pour les petites ; Caractéristiques mesurées : 2'150 kg/m³, 1.10 kJ/K.kg ; Fraction de vide : 0.39.

- Plaques de terre cuite (Tuilerie de Bardonnex Genève), de 15 x 31 cm pour 2.5 cm d'épaisseur, empilées de façon régulière avec pour interstice des cales calibrées de 1 ou de 2 mm; Caractéristiques mesurées : 1'820 kg/m³, 1.05 kJ/K.kg; Fraction de vide : 0.04 (écartement 1 mm) et 0.07 (écartement 2 mm).
- Briques perforées en terre cuite (Tuilerie de Bardonnex Genève), de 25 x 6 cm pour 12 cm de haut (sens des perforations), empilées horizontalement afin de laisser passer l'air dans le sens de la longueur. Caractéristiques mesurées : 1'890 kg/m³, 0.93 kJ/K.kg ; Fraction de vide : 0.34.

D'une durée typique de 5 jours (+ 2 jours mise en route), les mesures sont effectuées pour différents débits d'air (situés entre 10 et 1000 m³/h par m²), avec prise d'air à température relativement stable (laboratoire) et chauffage électrique à l'entrée du déphaseur (superposition de quatre sinus de fréquence 24, 12, 8 et 6 h, afin de calibrer le modèle analytique simultanément sur plusieurs fréquences).

Analyse et résultats

L'analyse des mesures se fait en quatre étapes :

- Analyse par série de Fourier des mesures de température entrée et sortie du déphaseur.
- Pour chaque fréquence, modélisation par modèle de Schuman (y compris effets de bord, importants dans le cas du caisson de section réduite).
- Minimisation par optimisation non-linéaire de l'erreur quadratique mesure / modèle du signal complet (somme de toutes les fréquences), afin de déterminer le débit effectif et l'échange convectif effectif.
- Avec le modèle ainsi calibré, extrapolation à une longueur permettant le déphasage complet de la fréquence journalière (retard de 12 h), et suppression des éventuels effets de bords.

Nous obtenons finalement les résultas expérimentaux suivants :

- Conformément au modèle, la longueur nécessaire au déphasage complet augmente linéairement avec le débit, avec pour ordre de grandeur 1 m de stock par 100 m³/h.m² d'air.
- Des transmissions supérieures à 70% sont atteintes pour les billes, ceci déjà pour des débits de l'ordre de 200 m³/h. S'il s'agit de la meilleure performance thermique, c'est également la solution la plus coûteuse, du moins avec les matériaux utilisés (plus de 10'000 CHF/m³).
- L'utilisation d'un lit de graviers est possible et serait certainement le plus simple et le moins coûteux à réaliser (50 CHF/m³), mais elle demande un contrôle très grand de la granulométrie. Si quelques mesures sur ces matériaux ont abouti à des transmissions supérieures à 50%, des séries de mesures sur d'autres graviers à priori semblables (en tout cas à la commande) se sont avérées très décevantes, avec des transmissions inférieures à 30%. A ce stade, un certain doute subsiste quant à l'utilisation de ces matériaux et seule une étude sur les inhomogénéités du flux à l'intérieur d'un lit de particules peu ou non sphériques pourrait lever cette incertitude.
- Des transmissions supérieures à 70% sont également atteints pour les planelles en terre cuite, pour des débits cependant supérieurs à 600 m³/h (soit des longueurs supérieures à 6 m). Contrairement aux billes il s'agit ici de matériaux courants, mais comme pour ces dernières la mise en place doit être soignée, afin d'éviter les inhomogénéités de flux.

- Les pertes de charges occasionnées par le déphaseur sont très réduites (de l'ordre de 50 Pa au maximum pour un déphasage de 12 h), mis à part pour la géométrie plane et l'écartement de 1mm (plus de 100 Pa pour un déphasage de 12 h).

Finalement, une configuration expérimentale de 3 m de long (section : 0.5x 0.5 m ; stockage : plaques céramique de 1.7 cm d'épaisseur et 2 mm d'interstice) permet de vérifier l'extrapolation du modèle, avec pour résultats :

- Pour un débit de 580 m³/h.m² un déphasage de 8.0 h et une transmission de 61% (70% sans effets de bords).
- pour un débit de 800 m³/h.m² un déphasage de 5.5 h et une transmission de 76% (82% sans effets de bords).

INTÉGRATION AU SYSTÈME DE VENTILATION ET CARACTÉRISTIQUES ATTENDUES

Le modèle ainsi validé permet de reconstruire la réponse d'un prototype de 4.5 m de long traversé par un flux de 580 m³/h.m², qui permettrait de retarder de 12 h le pic de fraîcheur nocturne, quasiment sans l'amortir (Fig. 3). Intégré au système de ventilation en parallèle à de la ventilation nocturne directe, le pic de fraîcheur deviendrait ainsi disponible une seconde fois au milieu de la journée. Reste à déterminer le dimensionnement idéal d'un tel système, en accord avec la dynamique du bâtiment (gains internes, masse thermique, protections solaires).



Figure 3 : Stratégie de ventilation et profil sur cinq jours d'été (températures de ventilation ainsi que potentiel de rafraîchissement par rapport à 26 et 28°C).

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à tous ceux qui ont positivement participé à ce projet, en particulier :

- L'Office fédéral de l'énergie et en premier lieu J.-C. Hadorn, pour l'aide financière, l'appui et la confiance accordée pour le développement de cette nouvelle philosophie de stockage de la chaleur / fraîcheur.
- La société « Tuilerie de Bardonnex », en particulier son directeur Monsieur Stadelmann, qui nous a prêté les différents matériaux en terre cuite dont nous avons eu besoin.

REFERENCES

- 1. Schumann T.E.W., Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. J. Franklin Inst. 208, pp. 405–416, 1929.
- 2. Hollmuller P., Lachal B., Zgraggen J.-M., Déphaseur thermique diffusif, Rapport de recherche, CUEPE, Université de Genève, 2004.