

## Rapport annuel 2002 à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie

**Nom du rapporteur :** Pierre HOLLMULLER, pierre.hollmuller@cuepe.unige.ch

**Institut mandataire :** Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie (CUEPE), [www.cuepe.ch](http://www.cuepe.ch)

**Chercheurs associés :** Bernard LACHAL, Jean-Marc ZGRAGGEN

**Titre du projet :** Déphasage thermique diffusif

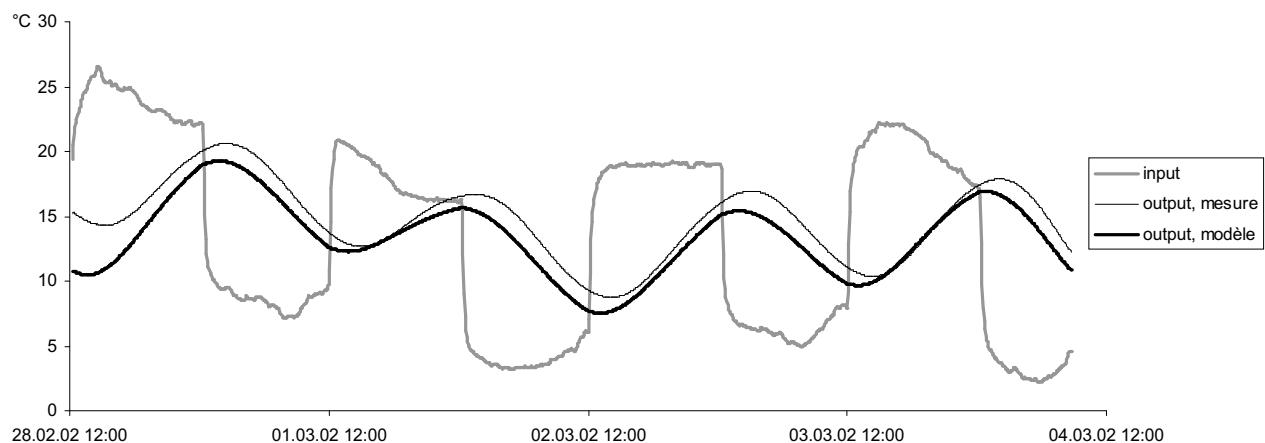


Fig. 1 : Déphasage à amortissement quasi nul d'une fréquence journalière "carrée" : comparaison entre mesure et modèle analytique.

### Résumé

La possibilité de déphaser une oscillation thermique sans quasiment l'amortir (Fig. 1), par échange thermique entre un fluide caloporteur (air ou eau) et une couche mince de matériau diffusif isolée, a été mise en évidence (théorique puis expérimentale) au cours d'une précédente étude, concernant le potentiel de préchauffage/rafraîchissement par puits canadien [1]. Ce phénomène s'avère particulièrement prometteur en régime journalier où il permettrait, par déphasage de 12 heures de la température météo, d'induire un important potentiel de rafraîchissement des bâtiments. Il pourrait également être utilisé en régime annuel, permettant à la fois de livrer en hiver de l'énergie solaire estivale et de transférer vers l'été du froid hivernal.

Les buts du projet sont :

- L'approfondissement théorique du concept de déphasage thermique à amortissement quasi-nul et l'identification d'applications pour le stockage de la chaleur et de la fraîcheur.
- L'étude paramétrique de différents matériaux et de différentes configurations géométriques.
- Le développement d'un ou deux prototypes pour le rafraîchissement par déphasage journalier.
- Le test *in situ* des prototypes en rafraîchissement passif.
- La mise sur pied d'un projet d'installation pilote.

## 1. Objectifs 2002

L'objectif 2002 du projet (qui a débuté à la fin de cette année seulement) fut l'approfondissement théorique du concept de déphasage thermique à amortissement quasi-nul et l'identification d'applications pour le stockage de la chaleur et de la fraîcheur.

### Résolution mathématique, cas de base

Jusqu'ici, le phénomène avait été mis en évidence pour une géométrie cylindrique ou plane (Fig.2), l'étude théorique procédant par résolution mathématique de l'équation régissant l'échange convectif entre le fluide et le matériau, couplée à celle régissant la diffusion de chaleur dans ce dernier.

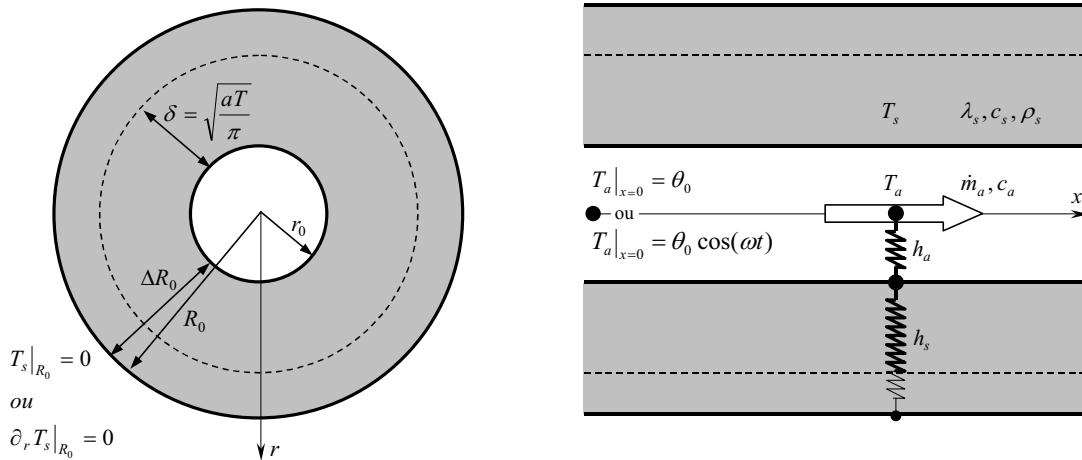


Fig. 2 : Echangeur diffusif cylindrique : coupes perpendiculaires et longitudinales.

Pour un signal d'entrée sinusoïdal, le système répond comme on peut s'y attendre par amortissement et déphasage de ce dernier :

$$T_a(x, t) = \theta_0 \cdot \exp\left(-\frac{2\pi r_0}{c_a \dot{m}_a} h x\right) \cdot \cos\left(\omega(t - \Delta t_x) - \frac{2\pi r_0}{c_a \dot{m}_a} k x\right)$$

$$h = \frac{h_a h_s}{h_a + h_s} + \Delta h$$

$$k = \frac{h_a k_s}{h_a + h_s} + \Delta k$$

où les coefficients  $h$  et  $k$  sont essentiellement donnés par couplage en série du coefficient d'échange convectif  $h_a$  avec de coefficients d'amortissement et déphasage  $h_s$  et  $k_s$  propre au matériau et à l'épaisseur de ce dernier (Fig. 3).

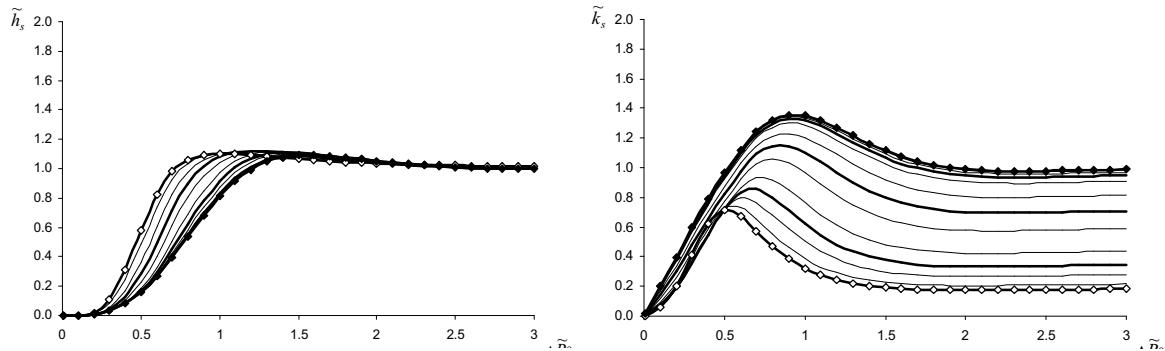


Fig. 3 : Coefficients d'amortissement et déphasage  $h_s$  et  $k_s$  en fonction de l'épaisseur de sol  $\Delta R_0$  (valeurs réduites).

Or, pour des conditions au bord adiabatiques et une couche mince ( $\Delta R_0 < 0.2\delta$ , où  $\delta$  est la longueur de pénétration, propre au matériau et à la fréquence considérée), on constate que le coefficient de déphasage  $k_s$  garde une valeur résiduelle alors que le coefficient d'amortissement  $h_s$  est déjà quasiment annulé. Ceci permet (à condition d'un bon couplage convectif, afin que  $\Delta h$  reste faible) de complètement déphaser le signal d'entrée, quasiment sans l'amortir.

#### Résolution mathématique, diverses géométries

En couche mince et pour la géométrie cylindrique (avec flux interne) retenue jusqu'ici, le rapport entre déphasage et amortissement grandit avec le rayon du tube, le cas plan (cas limite) offrant le plus grand potentiel de déphasage à amortissement nul (Fig. 3). Il semblait fort possible que ce phénomène, vraisemblablement lié à une dispersion réduite de la chaleur, puisse être accru en réduisant encore cette dispersion, çà en considérant l'une ou l'autre des géométries suivantes :

- cylindrique à flux externe (air balayant une série de tubes disposés perpendiculairement au flux)
- sphérique (type « rock bed »)

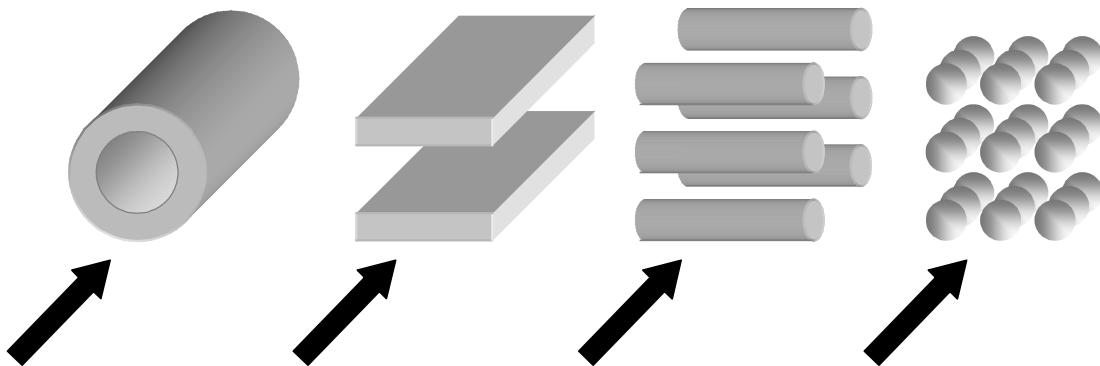


Fig. 4 : Différents types de géométrie pour déphasage thermique diffusif.

Afin de vérifier la pertinence de cette hypothèse, il s'agissait donc en un premier temps, en analogie à ce qui avait déjà été fait, de poser et résoudre les systèmes d'équations correspondants, ces nouvelles géométries pouvant ouvrir la porte à une mise en œuvre technique plus simple.

## 2. Travaux et résultats 2002

#### Résolution mathématique, diverses géométries

La résolution en géométrie sphérique a été menée à bout, et celle en géométrie cylindrique à flux externe touche à sa fin. Dans les deux cas le phénomène recherché apparaît clairement, avec l'avantage d'un rapport surface échange / volume de stockage plus élevé que pour les géométries précédemment résolues (plane, cylindrique à flux interne). Le problème du couplage convectif, critique en mode journalier et avec de l'air comme fluide caloporteur, perd ainsi en importance, ce qui facilitera le développement d'un déphaseur journalier à coûts réduits.

#### Outil de dimensionnement

Afin de synthétiser et comparer les différents résultats, un outil de calcul paramétrique avec représentations graphiques intégrées a été développé (Fig. 5). En partant des paramètres d'ingénierie habituels (débit, vitesse d'écoulement) il permet entre autres de représenter (en fonction de l'épaisseur des couches minces mises en œuvre) la dimension du système (volume et longueur), la surface d'échange associée, ainsi que l'amplitude résiduelle après déphasage : ceci en mode annuel ou journalier, pour l'une ou l'autre des géométries, avec de l'air ou de l'eau comme fluide caloporteur, ainsi que pour différents matériaux de stockage. Un mode de visualisation en valeurs réduites permet de comprendre les phénomènes physiques en jeux, alors que le mode de visualisation en valeurs réelles permet de dimensionner les systèmes.

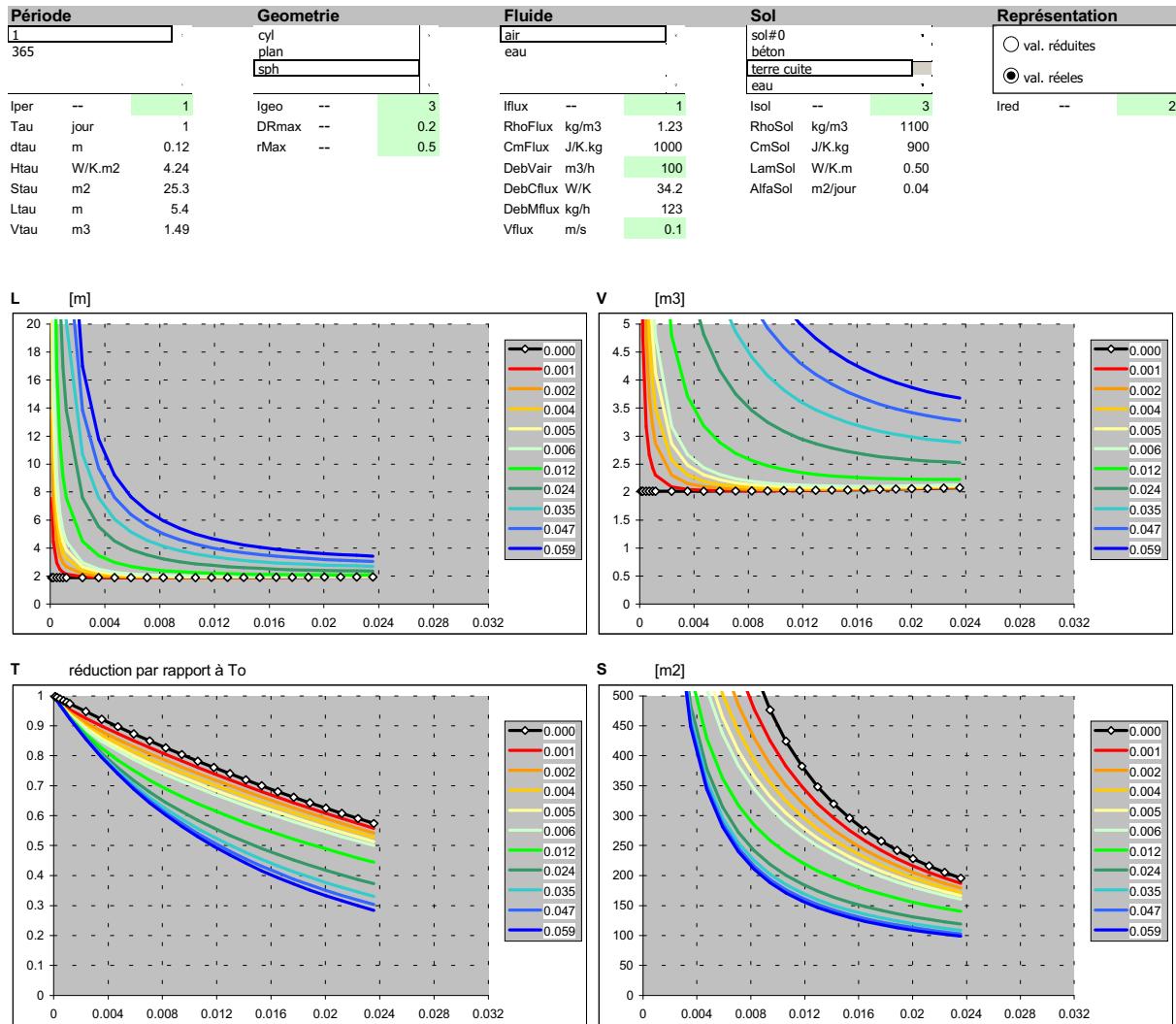


Fig. 5 : Outil de dimensionnement pour déphasage thermique

#### Identification d'applications pour le stockage de la chaleur et de la fraîcheur

Les résultats obtenus jusqu'ici permettent d'ores et déjà d'envisager le développement d'un prototype avec un stock d'une emprise d'environ 2 m<sup>3</sup> pour le déphasage journalier d'un débit d'air de 100 m<sup>3</sup>/h. Des calculs préalables semblent montrer que le concept de déphasage pourrait également être développé avec des volumes raisonnables pour le déphasage de l'oscillation annuelle.

### 3. Collaborations

Néant pour l'instant, à redéfinir selon l'avancement et les résultats obtenus.

### 4. Transferts

Néant pour l'instant, à redéfinir selon l'avancement et les résultats obtenus.

### 5. Perspectives 2003

#### Pour 2003

En complément au calcul analytique, le gros de l'étude (qui aura lieu l'année prochaine) comprendra les points suivants :

- Simulations numériques permettant de caractériser l'influence de paramètres omis dans l'approche analytique (variations de débit, diffusion longitudinale, adiabaticité incomplète, éventuels échanges latents).
- Identification d'une ou plusieurs solutions technique et économiquement optimales (prestation énergétique, géométrie et taille, disponibilité des matériaux, mise en œuvre, entretien, consommation électrique auxiliaire, coûts).
- Construction et mesure détaillée, en condition réelle, d'un ou deux prototypes pour le déphasage journalier.
- Selon les résultats obtenus, en collaboration avec un/des bureaux d'ingénieurs, planification et mise en place d'un projet pilote et démonstration (à réaliser dans le cadre d'un projet ultérieur).

#### A plus long terme

Développements ultérieurs à définir selon les résultats obtenus (en particulier en ce qui concerne le déphasage annuel).

#### **6. Publications**

1. Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments», Hollmuller P., Thèse, Université de Genève, 2002.
2. Analytical characterisation of amplitude dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, Hollmuller P., Int. J. of Heat and Mass Transfer, soumis en août 2002.