

Etude aérodynamique d'un déphaseur d'ondes thermiques

Requérant : Patrick Haas, Prof. HES
Groupe de compétences en mécanique des fluides
et procédés énergétiques (CMEFE)
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia)

Co-requérant : Peter Egolf, Prof. HES
Institut de génie thermique (IGT)
Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)

Partenaire : Dr. Pierre Holmuller
Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)
Université de Genève

06.10.2009

<http://www.cmefe.ch>

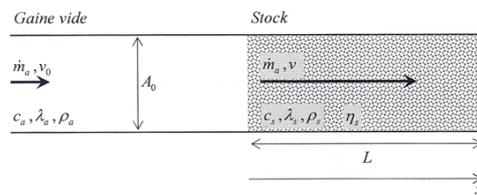
1. Contexte

« La forte croissance de la climatisation exerce une pression importante sur le réseau électrique »

- Croissance des unités de climatisation : 7% / an
- Nombre d'unités en Europe : 1996 : 7.4 millions, 2020 : 33 millions
- Climatiseurs individuels : 1996 : 11 TWh, 2020 : 44 TWh
= consommation du Portugal en 2001
- A Genève (400'000 hab.), charge additionnelle sur le réseau électrique :
8 MW / °C supplémentaire de la température ambiante

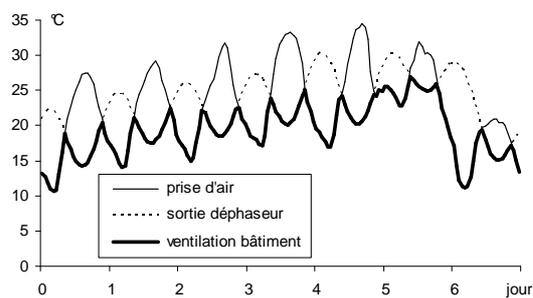
2. Le déphasage thermique

- Le Centre d'Etude des Problèmes de l'Energie (CUEPE) de l'Université de Genève travaille sur le comportement dynamique des registres terrestres
- Idée : Déphaser volontairement la température d'un écoulement
- Objectif : utiliser le pic de fraîcheur nocturne en période diurne



Le système agit comme une impédance thermique

Exemple d'évolution des températures



Objectifs :

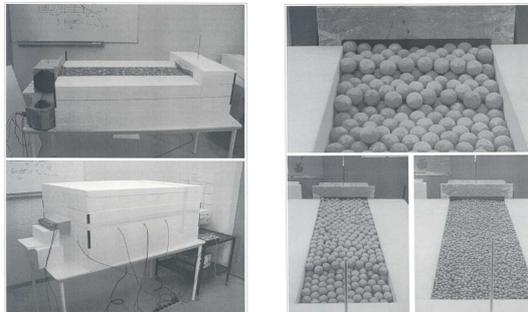
- Obtenir un déphasage d'environ 8 h
- Chercher à ne pas amortir le pic nocturne

3. Etudes antérieures

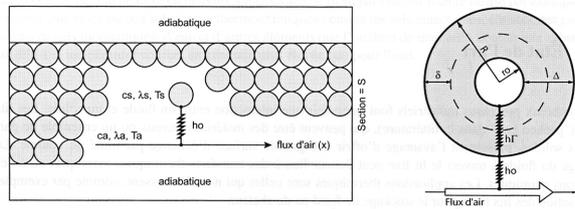
- L'OFEN finance en 2002 – 2004 une première étude théorique
- Travail de diplôme en physique et divers projets académiques à l'UNIGE
- Prix du cinquantenaire des SIG en 2004 (travail de diplôme de M. Zraggen)
- Bourse du développement durable 2005 du Canton de Genève : Café-Librairie « Les Recyclables »

Résultats obtenus à ce jour

- Modèles théoriques
- Prototypes de dimensions réduites pour la vérification expérimentale de certaines conclusions (UNIGE)



Modèle théorique



$$T_s(x, t) = \theta_o + \theta_w \exp \left[-\frac{S_{ech}}{\dot{m}_a c_a} h \right] \cos \left[\omega (t - \Delta t_s) - \frac{S_{ech}}{\dot{m}_a c_a} k \right]$$

$$h = \left[\frac{h_o(h_o h_{adi} + h_{adi}^2 + k_{adi}^2)}{(h_o + h_{adi})^2 + k_{adi}^2} \right]$$

$$h_{adi} = \frac{\lambda_s}{\delta} \left[\frac{\sinh(2\frac{\delta}{R}) + \sin(2\frac{\delta}{R})}{\cosh(2\frac{\delta}{R}) - \cos(2\frac{\delta}{R})} \right] - \frac{\lambda_s}{R}$$

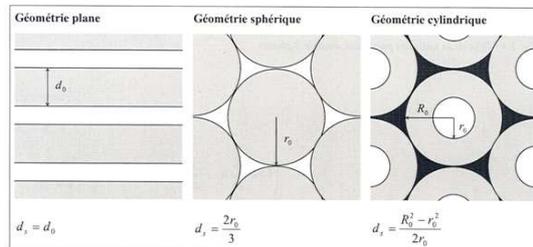
$$k = \left[\frac{k_{adi} h_o^2}{(h_o + h_{adi})^2 + k_{adi}^2} \right]$$

$$k_{adi} = \frac{\lambda_s}{\delta} \left[\frac{\sinh(2\frac{\delta}{R}) - \sin(2\frac{\delta}{R})}{\cosh(2\frac{\delta}{R}) - \cos(2\frac{\delta}{R})} \right]$$

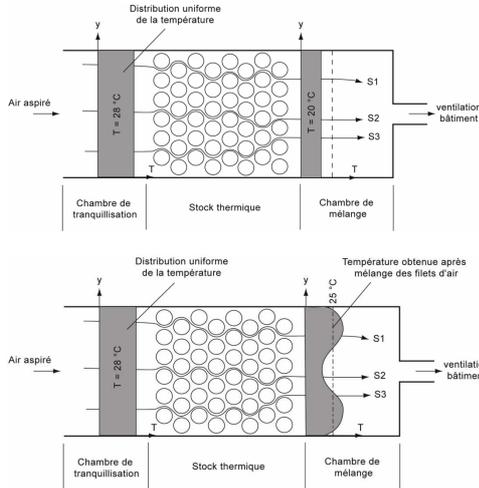
4. Problèmes rencontrés lors de l'application

- Eléments de stockage en couches minces
- Espaces interstitiels de 1 mm
- Déphasages non uniformes dans les parties du stock

Amortissement actuel du pic diurne d'environ 40 - 50 %



Effet de la non - uniformité du déphasage



Situation idéale :

Déphasage identique sur l'ensemble des éléments de stockage.

Situation actuelle :

Déphasage non-uniforme sur l'ensemble des éléments de stockage car l'historique des échanges fluide / solide n'est pas garanti.
 Diminution très sensible des performances du système.

HES-SO 06.10.2009

9 / 28

<http://www.cmefe.ch>

Besoins actuels

Pour appliquer le concept, les questions suivantes doivent encore trouver des réponses :

1. Déterminer les caractéristiques géométriques du système
2. Uniformiser l'échange fluide / solide dans une section donnée
3. Déterminer les matériaux à utiliser : traditionnels et/ou à changement de phase (chaleur sensible vs chaleur latente)

Ces tâches relèvent des activités d'un ingénieur, c'est à ce stade du développement que la HES-SO intervient.

HES-SO 06.10.2009

10 / 28

<http://www.cmefe.ch>

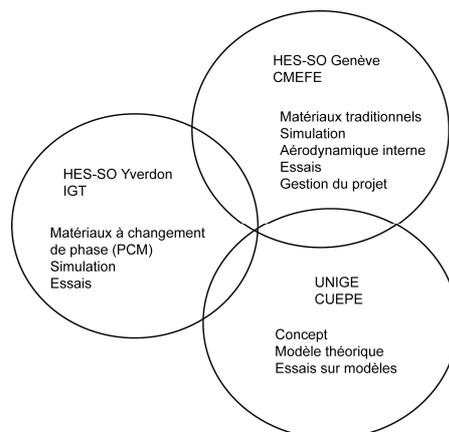
5. Objectifs

Les objectifs principaux de l'étude sont les suivants :

1. Caractériser l'écoulement de l'air dans le déphaseur (analyse numérique en volumes finis de type instationnaire CFD)
2. Déterminer les matériaux à utiliser :
 - a) Matériaux traditionnels (chaleur sensible)
 - b) Matériaux à changement de phase (chaleur latente)
3. Définir des règles de dimensionnement (dimensions du déphaseur vs débit d'air et déphasage souhaité)

Une transmission supérieure à 80% doit être atteinte pour permettre l'exploitation du concept

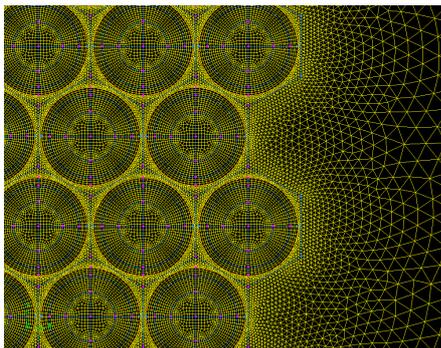
6. Organisation



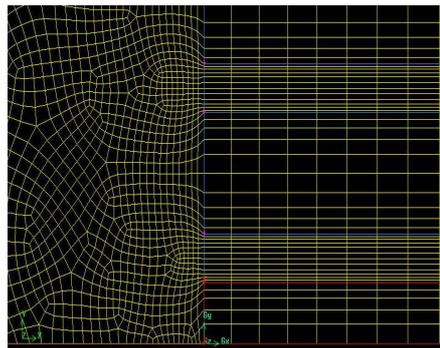
7. Etapes du projet

1. Réaliser un modèle numérique CFD de l'écoulement dans le déphaseur (analyse instationnaire)
2. Identifier les matériaux. Traditionnels et/ou à changement de phase (étude de faisabilité)
3. Construire un prototype partiel du déphaseur et réaliser des essais
4. Mesurer les performances du démonstrateur
5. Définir des règles de dimensionnement à l'aide du modèle CFD et des essais

8. Modèle de simulation CFD



Tubes très rapprochés



Plaques

8. Modèle de simulation CFD (suite)

Matériaux utilisés :

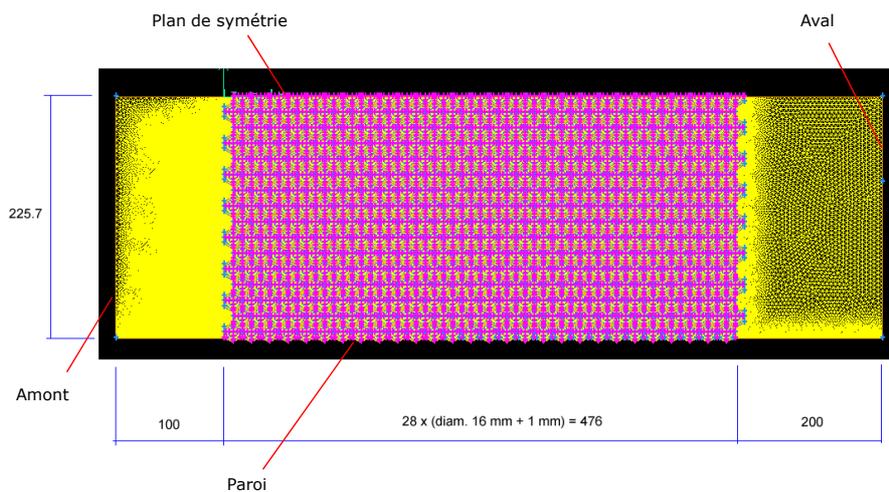
Eau (intérieur de tubes en pvc)
 Plaque de Al_2O_3

Modèle mathématique de résolution des équations :

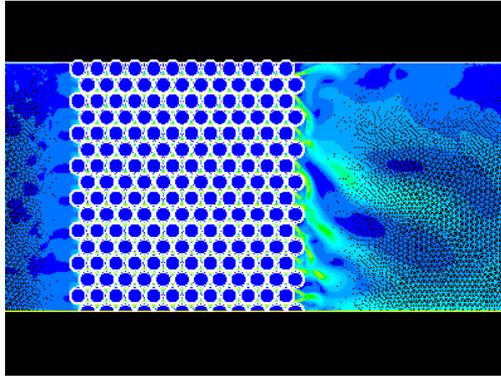
Explicite
 Modèle de turbulence k-w SST formulation bas nombre de Reynolds
 Teraèdres
 Traitement de couche-limite

Fluent 6.2

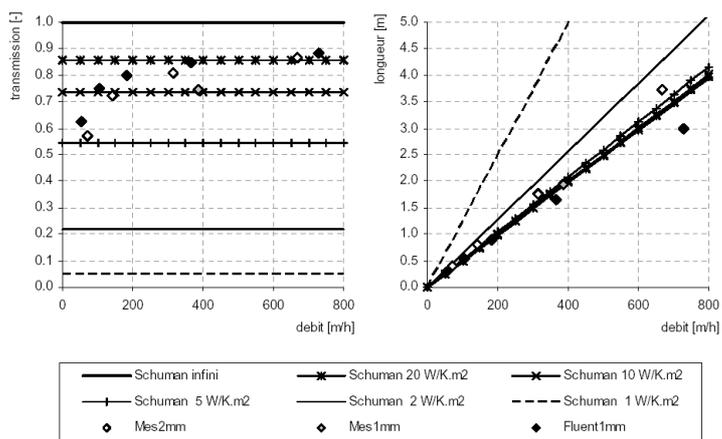
8. Modèle de simulation CFD (suite)



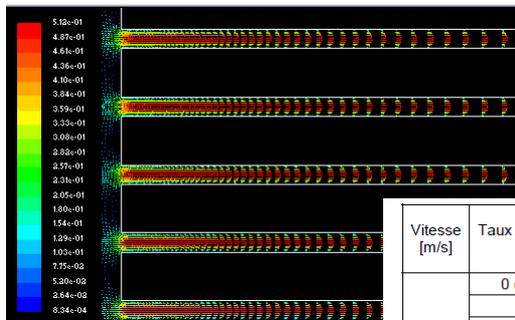
8. Modèle de simulation CFD (suite)



Comparaison avec les résultats existants



8. Modèle de simulation CFD (suite)



Vitesse [m/s]	Taux de turbulence [%]	Déphasage simulé [h]	Transmission [%]
0.10	0 (laminaire)	5.00	75
	1	5.00	75
	3	5.00	75
	7	5.00	75
	10	5.33	75
0.20	0 (laminaire)	2.67	94
	1	2.67	94
	3	2.67	94
0.42	1	1.33	98
	3	1.33	98

9. Influence de la vitesse dans le déphaseur et de la chaleur spécifique du stock

Vitesse [m/s]	Déphasage simulé [h]	Transmission simulée [%]	Déphasage de 8 heures (extrapolation)		Déphasage de 12 heures (extrapolation)	
			Longueur équivalente [m]	Transmission [%]	Longueur équivalente [m]	Transmission [%]
0.05	4.67	90.6	0.35	84.4	0.52	77.5
0.10	2.67	96.7	0.61	90.4	0.92	85.9

Influence de la vitesse moyenne amont

Chaleur spécifique massique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Vitesse [m/s]	Déphasage simulé [h]	Transmission simulée [%]	Déphasage de 8 heures (extrapolation)		Déphasage de 12 heures (extrapolation)	
				Longueur équivalente [m]	Transmission [%]	Longueur équivalente [m]	Transmission [%]
38 (matériau hypothétique)	0.05	0.83	92.9	1.96	49.5	2.94	34.8
381 (cuivre)	0.05	3.33	88.8	0.49	75.3	0.73	65.3

Influence de la chaleur spécifique du stock

10. Réalisation d'un prototype

Constructions réalisées :

- Sphères céramiques (grands diamètres)
- Tubes PVC remplis d'eau
- Plaques

Idée :

Surface d'échange sphère : $S_{ech} = 3 V_{bille} / r_{bille}$

Des sphères se répartissent dans un volume avec une compacité de 0.64 : $V_{billes} / V_{tot} = 0.64$

Soit $S_{ech} = 1.92 V_{tot} / r_{bille}$

Construction :

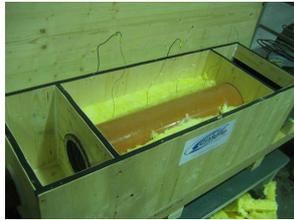
On remplit un tube de billes et on le vibre pour mettre en place les billes avec une compacité de 0.64.

10. Réalisation d'un prototype (suite)



250 Kg de billes

10. Réalisation d'un prototype (suite)



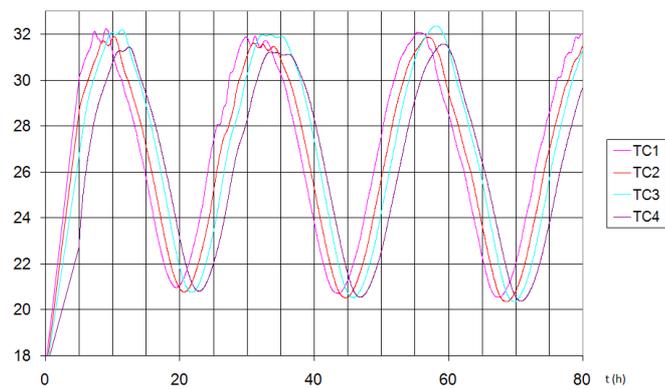
- Thermocouples espacés de 20 cm
- Résistance chauffante en amont
- Pilotage de la puissance par relais statique
- Contrôleur à trains d'ondes

HES-SO 06.10.2009

23 / 28

<http://www.cmefe.ch>

11. Performances du prototype



Evolution des températures sur quelques périodes

HES-SO 06.10.2009

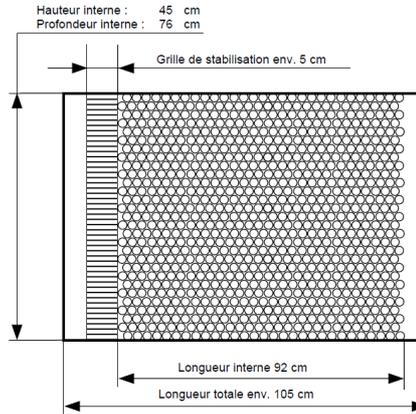
24 / 28

<http://www.cmefe.ch>

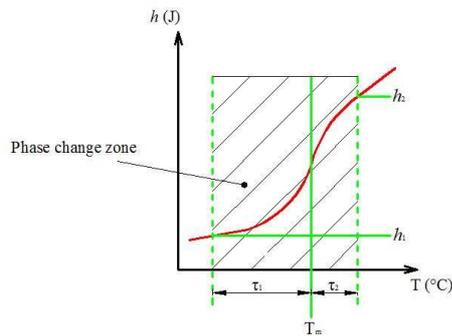
11. Performances du prototype (suite)

Proposition pour une gaine d'air neuf d'une villa de 5 personnes :

- 0.10 m/s en amont du stock
- 25 m³/h par personne
- Transmission : 86 %
- Déphasage : 12 h



12. Utilisation des matériaux à changement de phase

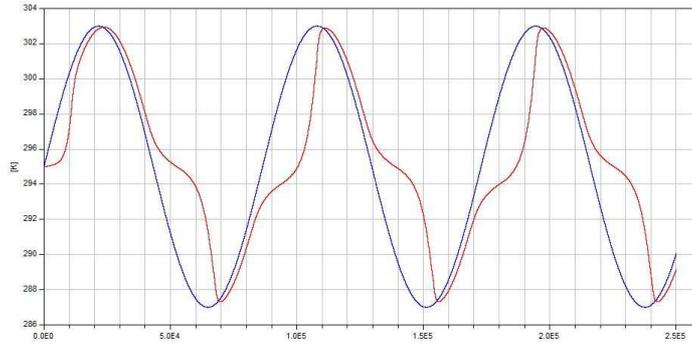


Evolution de l'enthalpie en fonction de la température



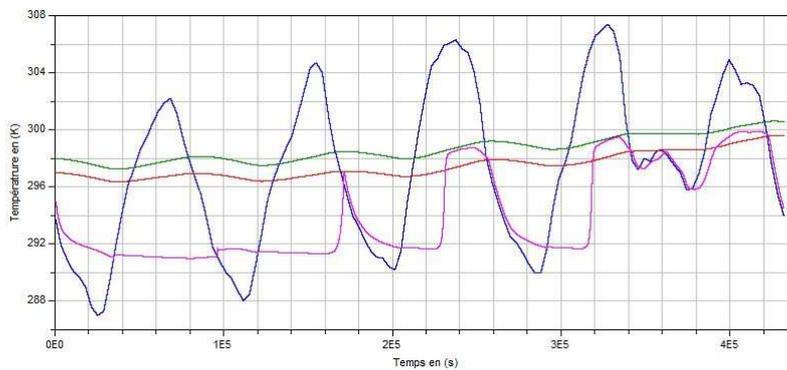
Etablissement d'un modèle Dymola-Modelica

12. Utilisation des matériaux à changement de phase (suite)



Déphasage avec 10 tubes de 2 cm de diamètre

12. Utilisation des matériaux à changement de phase (suite)



Evolutions typiques obtenues avec des PCM

13. Conclusion

1. Un procédé intéressant par compactage de billes par vibration a été présenté et évalué
1. Une étude de faisabilité montre une certaine ouverture à l'utilisation des PCM. Le choix d'un tel matériau montre des avantages liés à la capacité thermique massique, mais pose des problèmes d'amortissement à étudier.
2. Des règles de dimensionnement basés sur un déphaseur à tubes ont été proposées. A ce stade du développement, un déphaseur muni de tels éléments est réalisable.
3. Une mise en place sur un site pilote est envisagée par le groupe d'étude

Contacts

*Patrick Haas, Prof. HES
CMEFE / hepia
patrick.haas@hesge.ch
<http://www.cmefe.ch>*

*Peter Egolf, Prof. HES
IGT / HEIG
peter.egolf@heig-vd.ch*