



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS
34100 TRIESTE (ITALY) - P.O. B. 586 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONE: 3240-1
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460592-1

H4.SMR/193 - 23

"COLLOQUE INTERNATIONAL SUR LA SCIENCE DES MATERIAUX POUR L'ENERGIE".
(26 août - 11 septembre 1986).

STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE
DE CHANGEMENT D'ETAT

Sergio Alvarado

Université du Chili
Santiago, Chile

Ces notes de recherche provisoires, sont destinées aux participants. Eventuellement, d'autres copies seront disponibles au bureau 231.

STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE
DE CHANGEMENT D'ETAT

Sergio Alvarado
Faculté de Sciences Physiques et Mathématiques
Université du Chili
Casilla 2777, Santiago Chile.

RESUME.

On présente quelques résultats des études théoriques et expérimentales concernant le stockage thermique par chaleur latente de changement de phase. Pour la première partie des études on a adopté une géométrie cylindrique verticale, de la paraffine industrielle comme matériel stockeur et du cuivre ou bronze pour les échangeurs de chaleur. Le modèle théorique développé décrit satisfaitement le phénomène (transfert de chaleur par conduction et convection simultanées avec une frontière mobile) mais l'effort de calcul sur ordinateur est presque prohibitif. Les résultats empiriques confirment bien l'importance de la convection et l'amélioration obtenue par l'addition des ailettes aux échangeurs. D'autre part, on constate la tendance de la paraffine à réagir chimiquement avec le cuivre.

1. INTRODUCTION.

On sait bien que l'utilisation de la chaleur en tant qu'énergie utile (chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des locaux, processus industriels, etc.) pose fréquemment le problème du stockage du fait du décalage temporel entre production et demande de chaleur.

En ce qui concerne particulièrement la conversion photothermique et photovoltaïque de l'énergie solaire, il faut, en général, prévoir des systèmes d'accumulation couplés aux capteurs, étant donné le caractère essentiellement intermittent et aléatoire du gissement solaire. (1).

C'est pour cela qu'une partie importante des efforts de recherche dans le domaine du solaire est consacrée au stockage, soit sous forme de chaleur (sensible ou latente) soit comme énergie chimique (accumulation thermo-chimique ou électro-chimique).

2. LES TECHNIQUES DE STOCKAGE THERMIQUE.

Pour magasiner de l'énergie thermique il y a diverses possibilités, dont le stade de développement technologique est différent.

A présent, on connaît les possibilités suivantes:

i) Accumulation par chaleur sensible.
On peut dire que cette technologie est bien développée. L'utilisation de l'eau, des huiles, des galets, des éléments architectoniques des bâtiments (le mur Trombe étant l'exemple qui a connu plus de succès), est très répandue.

ii) Accumulation par chaleur latente.
Le stockage par chaleur latente de changement d'état (solide ~~ou~~ liquide) offre un intérêt particulier:

- La densité d'énergie (Joule/m³) est élevée par rapport au stockage par chaleur sensible;
- la chaleur est récupérée à température constante;
- on dispose, en principe, des matériaux qui couvrent un large spectre des températures;
- il semble s'adapter bien aux applications solaires actives et passives;
- les technologies mises en jeu sont relativement simples.

Cette technologie, par contre, n'est pas suffisamment développée, se posant problèmes dans le domaine de la recherche fondamentale (transfert de chaleur en deux phases avec frontières mobiles) et du comportement des matériaux.

iii) Stockage thermo-chimique.

Cette forme d'accumulation de chaleur présente également des avantages:

- l'isolation thermique n'est pas nécessaire, donc, elle convient au stockage de long terme;
- on peut obtenir des densités d'énergie élevées;
- l'énergie magasinée peut être récupérée à température supérieure à la température de stockage;
- les produits chimiques résultants de la réaction endothermique (charge) sont susceptibles du transport indépendant.

Les technologies de stockage thermo-chimique (exemples: calo-duc chimique, pompe à chaleur thermo-chimique, production d'hydrogène, etc.) sont relativement compliquées, chères, sa mise au point exigeant encore de la recherche.

3. STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE DE CHANGEMENT DE PHASE.

Au Département de Génie Mécanique de l'Université du Chili, après avoir travaillé sur certaines applications du stockage par chaleur sensible (exemple: chauffage des serres) on fait dès 1983 des efforts (modestes, bien entendu) pour essayer de développer des systèmes de stockage par chaleur latente de changement d'état (2).

Sur le plan théorique on a été amené à étudier le transfert de la chaleur par conduction et convection simultanées avec une frontière mobile. La modélisation traditionnelle ne tient pas compte de la convection ou bien celle-ci est incluse en faisant trop des hypothèses simplificatrices, y comprise la géométrie.

En géométrie cylindrique verticale (Fig. 1) le model de fusion est gouverné par les équations:

- de conduction (liquide): $\rho c_p \partial T / \partial t = k \nabla^2 T$

- de conduction (solide): $\rho_s c_{ps} \partial T_s / \partial t = k_s \nabla^2 T_s$

- de bilan d'énergie à l'interphase:

$$ds/dt = \left[k_s (\partial T / \partial r)_{r=s} - k (\partial T / \partial r)_{r=s} \right] / \rho h_{SL}$$

- de continuité: $\nabla \cdot \vec{V} = 0$

- de quantité de mouvement: $D\vec{V}/Dt = -\nabla p - \rho g z \hat{k} + \mu \nabla^2 \vec{V}$

ou ρ = densité du liquide, ρ_s = densité du solide

c_p = chaleur spécifique du liquide

c_{ps} = chaleur spécifique du solide

T = température du liquide

T_s = température du solide

t = temps

h_{SL} = chaleur latente de fusion

$\vec{V} = u\hat{k} + v\hat{r}$ = vitesse des particules du liquide

p = pression (phase liquide)

μ = viscosité (phase liquide).

Puisque le problème n'a pas une solution analytique exacte, on a suivi une méthode numérique. Dans l'étape initiale du procédé numérique il convient d'éliminer la pression en utilisant les fonctions courant et vorticité.

Les paramètres adimensionnels qui intéressent particulièrement sont:

- Prandtl = ν/α

- Rayleigh = $g\beta(T_p - T_f)r_0^3 / \nu\alpha$

- Stefan = $c_p(T_p - T_f) / h_{SL}$

- Fourier = α/r_0^2 .

ou ν = viscosité cinématique

α = diffusivité thermique = $k/\rho c_p$

β = coefficient de dilatation thermique

T_p = température de paroi (échangeur)

T_f = température de fusion.

On constate que tous les quatre groupes adimensionnels sont liés aux propriétés thermophysiques du matériel de changement de phase.

En ce qui concerne l'expérimentation, on a fait des essais avec des accumulateurs cylindriques dont les objectifs étaient:

- obtenir le champs instantané des températures, duquel on peut déduire la position et vitesse de déplacement de l'interphase solide-liquide;
- vérifier les prédictions du modèle théorique de fusion;
- comparer la performance des échangeurs avec et sans ailettes et étudier l'influence du rapport géométrique hauteur/diamètre du cylindre;
- vérifier le comportement des matériaux, en particulier la stabilité physico-chimique du matériau stockeur après un grand nombre de cycles stockage-déstockage.

A ce but, on a essayé deux dispositifs, en utilisant les suivants matériaux pour les principaux composants:

- stockage: paraffine industrielle
- échangeur: cuivre (dispositif N° 1); bronze (dispositif N° 2).
- container: cuivre (dispositif N° 1); pyrex (dispositif N° 2).

Les propriétés thermophysiques de la paraffine utilisée sont:

	Phase	
	Solide	Liquide
Chaleur spécifique (KJ/kg°C)	2,0	2,1
Chaleur latente de changement de phase (KJ/kg)	185	132
Coefficient de dilatation (K ⁻¹)	0,21 · 10 ⁻²	
Conductivité thermique (W/m°C)	0,22	0,13
Diffusivité thermique (m ² /s)	13,51 · 10 ⁻⁸	7,89 · 10 ⁻⁸
Température de fusion ou solidification (°C)	47	52
Viscosité cinématique (m ² /s)		4,0 · 10 ⁻⁶

Les données numériques sont représentatives dans l'intervalle de températures des essais. Certaines propriétés, comme la viscosité, dépendent fortement de la température.

Le stockage de la chaleur a été simulé en utilisant:

- Dispositif N° 1: de l'eau proche de l'ébullition (chauffage cylindre intérieur) et des résistances électriques (chauffage du cylindre extérieur);
- Dispositif N° 2: fluide (huile) caloporteur.

Le déstockage (refroidissement) fut simulé avec alimentation de la glace à l'intérieur du cylindre central (dispositif N° 2).

4. RESULTATS ET DISCUSSION.

4.1 Modélisation.

On a constaté que le modèle fournit des résultats (évolution du champ de température dans les deux phases et de la position de l'interphase) compatibles avec le phénomène observé. Toutefois, il faut signaler que l'effort de calcul numérique est immense à cause du pas de temps que l'on doit adopter pour garantir la stabilité et convergence de la méthode.

L'instabilité ne dépend pas du réseau utilisé pour discrétiser le domaine de la phase liquide, mais dépend très fortement du pas de temps, qui à son tour est lié aux paramètres adimensionnels.

La combinaison des nombres de Rayleigh, Stefan et Prandtl pour les cas étudiés (Ra ~ 10⁷; Ste ~ 1; Pr = 50,72) impose un pas de temps extrêmement petit, de l'ordre de 10⁻⁵ (temps adimensionnel). C'est à dire, pour faire une simulation en temps réel de 5 heures, il faudrait de l'ordre de 10⁶ U.C. sur un ordinateur IBM 370 mod. 3031.

Une explication physique du problème numérique se trouve dans la vitesse avec laquelle le flux convectif est établi.

On a vérifié, en utilisant la même méthode, que l'augmentation des nombres de Ra et Ste permet l'adoption d'un pas de temps raisonnable du point de vue de l'effort computationnel.

4.2 Expérimentation.

Les résultats montrent bien l'importance décisive de la convection, en regardant par exemple la courbure des profils de l'interphase (Fig. 2). En absence de convection (conduction pure) le profil devrait être une surface verticale se déplaçant parallèlement aux manteaux des cylindres. L'effet de la convection est évidemment moins prononcé dans le refroidissement (décharge) (Fig. 3).

L'addition des ailettes au cylindre échangeur rend plus efficace l'accumulateur, en particulier pour le déstockage (solidification). On a mesuré une réduction du temps de solidification de 71% en ajoutant des ailettes qui augmentent 11 fois la surface d'échange du cylindre intérieur.

Le comportement du matériau stockeur au cyclage thermique (charge-décharge) est satisfaisant, d'après les résultats préliminaires (300 cycles) concernant les propriétés thermophysiques.

Un autre résultat empirique concerne le coefficient h, de transfert de chaleur par convection. Pour Ra < 4 · 10⁷ on a trouvé que le nombre de Nusselt devient indépendant du temps (convection bien établie) et peut se exprimer par la corrélation:

$$\bar{Nu} = \frac{38,5}{\log\left(\frac{Ra}{8,8 \cdot 10^6}\right)} \left\{ \left(\frac{Ra}{8,8 \cdot 10^6}\right)^{0,440} - \left(\frac{Ra}{8,8 \cdot 10^6}\right)^{-0,216} \right\}$$

\bar{Nu} étant défini comme: $\frac{\bar{h}_r \cdot d}{k}$

Par exemple, avec $Ra = 1,8 \cdot 10^7$, $r_0 = 2,5$ cm, $k = 0,13$ W/m²K, \bar{h} (représentatif de l'hauteur totale de l'échangeur) est de l'ordre de 140 W/m²°C.

Les paraffines ont des avantages: bon marché, stabilité, température de transition solide \rightarrow liquide utile pour certaines applications, enthalpie de changement de phase relativement élevée, comme déjà signalé par divers auteurs (par exemple Abhat (3)). Mais elles présentent deux inconvénients: une faible conductivité thermique et la tendance à réagir chimiquement avec le contenant et l'échangeur de cuivre.

Le premier problème peut être surmonté, comme on vient d'indiquer, par l'addition des ailettes ou, alternativement, par l'emploi d'un échangeur du type grille (réseau à grande surface d'échange).

Un palliatif pour le deuxième problème pourrait être l'addition d'une substance retardatrice de la réaction ou bien d'un revêtement protecteur du cuivre.

5. REMERCIEMENTS.

L'auteur exprime sa reconnaissance à: W. Zambrano, collègue et collaborateur; G. Concha, R. Saavedra, J. Saldías et A. Valencia, assistants de recherche, dont leur thèses ont fait partie des études ici mentionnés.

D'autre part, les études ont bénéficié de l'aide financière du Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) et du Département de Recherche de l'Université du Chili (DIB).

REFERENCES.

- (1) A. Donnadiou, "Stockage de l'énergie solaire", Comptes Rendus Seminaire sur l'Energie Solaire, Trieste, 1984.
- (2) Projets FONDECYT 0121/84 et DIB 1-2475/8613.
- (3) A. Abhat, "Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials", Solar Energy, Vol. 30, N° 4, 1983.

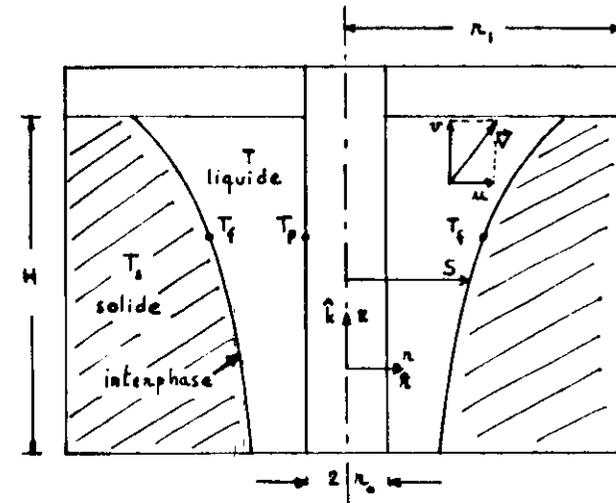


Fig. 1. Schéma modélisation Chauffage cylindre intérieur

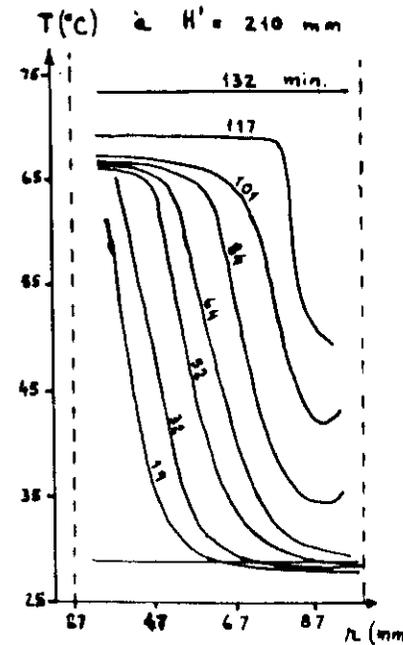


Fig 2. Exp. chauffage

$T_p = 90^\circ\text{C}$
 $H' = H/2$

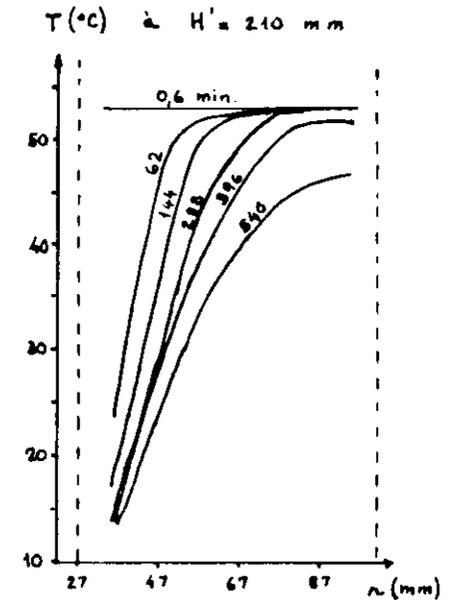


Fig 3. Exp. refroidissement

$T_p = 4,5^\circ\text{C}$
 $H' = H/2$

