Classification
Physics Abstracts
86.30R — 86.40F

Stockage thermique par chaleur latente dans la gamme 100 à 150 °C : Etude expérimentale et modélisation des cinétiques de stockage et de déstockage sur un accumulateur de 25 kWh

A. Bricard (*), J. Chabanne (*), A. Manificat (*) et F. Vachet (**)

(*) Commissariat à l'Energie Atomique, Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble,
Service des Transferts Thermiques, C.E.A.-C.E.N./Grenoble, 38041 Grenoble, France

(**) Rhône-Poulenc, Centre de Recherches de Décines.

(Reçu le 21 septembre 1981, révisé le 4 décembre 1981, accepté le 8 décembre 1981)

Résumé. — La production continue d'énergie mécanique ou calorifique à partir d'une source de chaleur intermittente (solaire, rejet thermique...) implique l'utilisation d'un accumulateur thermique dans la chaîne de conversion thermodynamique ou de récupération.

Ces dernières années, de nombreuses études sur le stockage thermique se sont développées pour apporter les éléments technologiques et économiques nécessaires à son utilisation. Ainsi la SOFRETES, RHONE-POULENC et le C.E.A. se sont-ils proposés, dans le cadre d'un contrat D.G.R.S.T., de caractériser un système de conversion utilisant une source de chaleur solaire à 150 °C et un stockage par chaleur latente de fusion d'une capacité utile de 200 kWh thermiques.

L'étude comprend deux parties. La première concerne la mesure des propriétés thermophysiques et la tenue au cyclage de matériaux fusibles dans la gamme de température 100 à 150 °C. La deuxième, à la fois expérimentale et théorique, traite des cinétiques de charge et de décharge et de l'optimisation du stockage. L'accumulateur, contenant 525 kg de produit calostockeur (anhydride phtalique) constitue une réalisation de caractère pré-industriel et un banc d'essai représentatif pour tester et valider les modèles.

Abstract. — The energy production provided by a heat excess or discontinuous source (solar, waste heat...) involve the utilization of a thermal storage in the thermodynamic or recuperation chain.

These last years, studies on thermal storage systems have been developed in order to bring technical and economic elements. The SOFRETES, RHONE-POULENC and the C.E.A. have proposed to characterize a conversion system constituted by a solar heat source and a 200 kWh thermal storage by latent heat of fusion.

The study includes two parts. The first one concerns the thermophysical properties and stability measurements of TES materials in the range of temperature 100-150 °C. The other one, both experimental and theoretic treats the charge and discharge kinetics and the optimization of the thermal storage. This one, filled with 525 kg of the TES material (Phtalic anhydrid) constitute a preindustrial application and a test bench to valid numerical models.

Nomenclature.

a_l	diffusivité du liquide.
C_{ps}	chaleur massique solide.
C_{pl}	chaleur massique liquide.
e	épaisseur de la plaque d'échange.
g	accélération de la pesanteur.
ΔH_F	enthalpie de fusion du matériau fusible.
H	hauteur du réservoir de stockage ou de la plaque d'échange.
h_c	coefficient d'échange de fusion.
L	longueur du réservoir de stockage ou de la plaque d'échange.
l	facteur d'élancement de la cavité ou largeur du réservoir.

Q_H	bilan enthalpique du matériau fusible.
Q_c	bilan thermique du fluide caloporteur.
Q_f	bilan thermique des fuites.
T_F	température de fusion du matériau fusible.
T_e	température d'entrée du fluide caloporteur.
T_s	température de sortie du fluide caloporteur.
T_p	température de la plaque d'échange.
T_∞	température liquide externe à la couche limite.
t	temps.
x_F	abscisse du front liquide-solide.
β	dilatabilité liquide.
λ_s	conductivité thermique solide.
λ_l	conductivité thermique liquide.
ρ_s	masse volumique solide.

ρ_1	masse volumique liquide.
μ	viscosité dynamique.
ν	viscosité cinématique.
φ	flux.
$d\delta$	déplacement élémentaire du front de fusion.
Ra	nombre de Rayleigh.
Re	nombre de Reynolds.
St	nombre de Stefan.

1. Introduction. — Dans un système de conversion thermodynamique de la chaleur (énergie solaire, rejets thermiques...), le dispositif de captation de l'énergie et le cycle de conversion thermodynamique imposent diverses contraintes sur le stockage. En premier lieu, la température : le stockage évolue ici entre la température maximale délivrée par la source chaude (150 °C), et le niveau minimal de température d'utilisation de la chaleur extraite (120 °C). Il convient d'obtenir une température de sortie du fluide caloporteur faiblement décroissante pour ne pas diminuer de façon sensible le rendement thermodynamique du cycle, le niveau thermique de la source froide étant de 30 °C.

Le stockage d'autre part, dans la réalisation dont il est question ici, assure une puissance constante de 12 kW thermiques pendant les 17 h de décharge et accumule 200 kWh_{th} pendant les 6 à 8 h disponibles pour réaliser la charge [1].

Les niveaux de puissance et de température, pour un matériau calostockeur donné, dépendent uniquement de la surface d'échange. Le problème essentiel du dimensionnement consiste dans l'optimisation de la structure d'échange pour fournir les éléments nécessaires à l'évaluation du bilan économique du système de conversion ou de récupération d'énergie.

Le dispositif d'essai représente un élément à l'échelle 1 d'un accumulateur de conception modulaire. Nous étudions successivement les périodes de déstockage et de stockage en insistant plus particulièrement sur cette dernière qui n'a pas fait l'objet de développements nombreux et dont la connaissance est importante pour les applications de récupération d'énergie. Les résultats expérimentaux sont ensuite comparés aux valeurs estimées par les modèles.

2. Etude du produit. — La figure 1 présente une collection de produits classés suivant leur température de fusion en fonction du coût du méga Joule stocké (coût du produit).

On constate que les produits minéraux sont plutôt rares dans la gamme 100-150 °C ; en particulier, le sel HITEC se situe à un prix relativement élevé par rapport à de nombreux produits organiques.

On trouve aussi le chlorure de magnésium à 6 H₂O, sel à fusion non congruente avec les inconvénients inhérents à ce type de sel (utilisation de stabilisants, épaississants) d'où son abandon.

Le soufre paraît intéressant, mais il présente de nombreuses variétés allotropiques, tant à l'état solide que liquide, pouvant être gênantes.

Fig. 1. — Coût énergétique de divers produits (prix 1979).

[Energetic coast of products.]

Il reste tout de même un assez grand nombre de produits organiques dont l'urée, à première vue bien attrayante, mais qui se décompose à son point de fusion en libérant de l'ammoniac.

Une première sélection à partir d'essais de stabilité thermique et de mesures de microcalorimétrie, dont les résultats sont portés dans le tableau I, dégage les produits suivants :

- Polyéthylène haute densité.
- Polyéthylène basse densité.
- Anhydride phtalique.
- Diméthyltéréphtalate.
- Acide adipique.

2.1 ESSAIS THERMOCINÉTIQUES. — On soumet les produits à une alternance de cycles fusion/cristallisation dans un appareil fonctionnant comme un macro-analyseur thermique différentiel sans grande prétention quantitative mais suffisamment sensible pour apprécier la stabilité chimique et la constance des propriétés physico-chimiques. On enregistre en continu la température de l'échantillon, T , la température différentielle, S , entre cet échantillon et un témoin fournissant les pics de fusion et de cristallisation (cf. Fig. 2).

Les surfaces des pics observées sur la macro ATD permettent d'apprécier l'évolution du produit, la température fournit des renseignements sur la sur-fusion.

Un échantillon, inférieur au gramme, est prélevé régulièrement pour les analyses chimiques (pureté) ou physiques (chaleur latente de fusion : par analyseur thermique différentiel et calorimètre CPC 600).

2.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS. — Des corps proposés sur la figure 1, ne demeurent d'intéressants économiquement et physiquement que :

- l'anhydride phtalique
- les polyéthylènes haute densité
- le diméthyltéréphtalate
- l'acide adipique

Tableau I. — *Essais préliminaires de stabilité thermique.*

[Thermal stability tests.]

Produits	(cal/g) ΔH fusion	(°C) T début fusion	Stabilité thermique Chauffage 10°/min. jusqu'à T_f + 100° puis 2° fusion	T recristallisation descente à 5°/min.
Glucose		152 °C	Superposition de la fusion et de la déshydratation Décomposition après déshydratation	
Acide adipique	61,6 $\pm$ 5 %	149 °C	Pas de décomposition	
Sulfate acide d'ammonium	25,2 $\pm$ 5 %	140 °C	Peu ou pas de décomposition	102 °C
Urée	51,2 $\pm$ 2 %	132 °C	Décomposition après fusion	71 °C
Anhydride phtalique	38,2 $\pm$ 5 %	131 °C	Pas de décomposition	
Polyéthylène	42,3 $\pm$ 5 %	123 °C	Décomposition après fusion vers 200 °C	117 °C
Acétate d'ammonium	—	117 °C	Décomposition endothermique après fusion	—
Formiate d'ammonium	68,5 $\pm$ 5 %		Décomposition à la fusion	
Pyrocatéchol	40,1 $\pm$ 5 %	113 °C	Pas de décomposition	
Acide phénoxyacétique	42,2 $\pm$ 5 %	98 °C	Très légère décomposition vers 200 °C

Fig. 2. — Thermogramme de l'anhydride phtalique.

[Differential thermal analysis on heating and cooling cycle; for the phtalic anhydrid.]

auxquels on peut ajouter :

- l'anhydride tétrahydrophtalique, non essayé, qui devrait aussi convenir puisque proche de l'anhydride phtalique ;
- le Bisphénol A, non testé car trop haut en température, qui est un produit attrayant constitué lui aussi de motifs benzéniques.

Ces six produits sont tous industriellement courants à des prix faibles car correspondant à des molécules relativement simples produites en grandes quantités. La stabilité thermique de l'anhydride phtalique, 7 000 h de cyclages (cycle 8 h) entre 110 et 150 °C, sa compatibilité avec l'aluminium A5, le situe en tête en tant que calostockeur.

L'acide adipique présente des instabilités inexplicables de la chaleur latente de fusion-cristallisation qui le rendent un peu suspect.

Les polyéthylènes haute densité peuvent devenir intéressants si la paroi d'échange calostockeur-caloporteur est un polymère, ou mieux du polyéthylène réticulé, en surface uniquement, ou dans toute la masse.

De plus :

- la conductibilité thermique est 2 à 3 fois celle des autres corps organiques.
- la chaleur spécifique du solide au voisinage de la température de fusion atteint 6 kJ/kg °C.

En revanche, l'effet thermique du matériau s'étale en température et surtout il peut être aléatoire et fonction de l'histoire thermique du matériau.

Finalement dans la gamme 100-150 °C ce sont les produits organiques composés fréquemment de noyaux benzéniques qui se comportent le mieux. Le seul corps minéral intéressant, le sel HITEC est largement hors des critères économiques retenus.

L'anhydride phtalique se présente comme le produit le plus intéressant parmi ceux abordés dans cette étude :

- stable
- pas cher
- de grande diffusion
- facilement confinable
- non toxique.

Seul son point d'éclair qui s'étale entre 151 et 165 °C présente un inconvénient.

Ce produit a été retenu comme charge du prototype, ses propriétés physiques sont les suivantes :

- température de fusion $T_F = 130\text{ °C}$
- chaleur latente de fusion $L = 159 \pm 8\text{ kJ/kg}$
- chaleur massique à T_F :
 - solide $C_{ps} = 1,42\text{ kJ/kg}$
 - liquide $C_{pl} = 1,73\text{ kJ/kg}$
- masse volumique à T_F :
 - solide $\rho_s = 1\,480\text{ kg/m}^3$
 - liquide $\rho_l = 1\,222\text{ kg/m}^3$
- conductibilité thermique :
 - solide $\lambda_s = 0,19\text{ W/m °C}$
 - liquide $\lambda_l = 0,15\text{ W/m °C}$
- viscosité vers T_F $\mu = 1,2 \times 10^{-3}\text{ Pl}$
- tension de vapeur à T_F 8 mm Hg

3. Dispositif expérimental. — Le circuit d'essai comprend :

- le module de stockage
- le circuit de fluide caloporteur
- les systèmes de mesure et d'acquisition de données.

3.1 LE MODULE DE STOCKAGE. — Le matériau d'accumulation, l'anhydride phtalique, est contenu dans un réservoir de forme parallélépipédique, disposé verticalement, le plus grand côté horizontal, de dimensions $H = 850\text{ mm}$, $L = 2\,065\text{ mm}$, $l = 270\text{ mm}$.

La surface d'échange est constituée par quatre échangeurs plans alvéolés en acier Aisi 304, espacés de 60 mm et immergés dans le corps de stockage. La figure 3 présente la vue d'une plaque de cotes $H = 750\text{ mm}$, $L = 1\,822\text{ mm}$, $e = 12\text{ mm}$; on distingue quatre

chicanes verticales qui permettent d'augmenter la vitesse de circulation du fluide caloporteur.

Les caractéristiques géométriques du réservoir de stockage et des échangeurs sont portées dans le tableau II.

Tableau II. — *Caractéristiques géométriques de l'échangeur et du réservoir de stockage.*

[Geometrical characteristics of the heat exchanger and of the storage.]

Volume interne du réservoir	470 l
Volume d'un échangeur $\approx$	10 l
Longueur d'échange développée d'une plaque	3,750 m
Largeur d'échange d'une plaque	0,365 m
Epaisseur moyenne du canal de circulation	$7 \times 10^{-3}\text{ m}$
Masse d'anhydride phtalique	525 kg
Surface spécifique d'échange	$23\text{ m}^2/\text{m}^3$

L'isolation est constituée de 50 mm de laine de roche et de 25 mm de laine de verre recouverte par une feuille de clinquant d'aluminium.

3.2 LE CIRCUIT DU FLUIDE CALOPORTEUR. — Le circuit d'eau, utilisée comme fluide caloporteur, est pressurisé à 5 bars, il comprend :

- le système de chauffage régulé en température,
- une pompe de circulation,
- le module de stockage,
- un échangeur secondaire avec vaporisation d'un fluide secondaire (eau).

3.3 SYSTÈME DE MESURE. — L'évolution de la température dans le matériau fusible pendant les phases de stockage et de déstockage est suivie par 36 thermocouples en Chromel-alumel dont les coordonnées sont portées sur la figure 4.

- 12 thermocouples sur la paroi de la plaque 2, plan X_0 , en regard de la plaque 3.

- 9 thermocouples dans le plan vertical situé à 1,4 cm de la plaque 2, plan X_{14} .

- 12 thermocouples dans le plan vertical médian des plaques 2 et 3 plan X_{28} .

- 3 thermocouples sur les centres respectifs des plaques 1, 3 et 4.

On dispose ainsi de 4 sections de mesure suivant l'axe horizontal du stockage avec 3 thermocouples verticaux sur les sections correspondantes, les symétries de l'ensemble permettent de déduire le champ de température dans toute la masse de matériau fusible.

Fig. 3. — Vue d'une plaque d'échange.
[Heat exchanger.]

Les températures sont enregistrées sur une chaîne d'acquisition de données (sensibilité 1 μ V) reliée à un ordinateur HP 9825 et stockées sur cassette. La cadence de scrutation choisie est de 2 min. Le débit d'eau sur les plaques d'échange est mesuré par des débitmètres à flotteurs (précision 1,2%). Les bilans thermiques sont effectués sur les plaques centrales 2 et 3, les plaques 1 et 4 constituant les éléments de garde.

4. Etude expérimentale. — 4.1 ETUDE DE LA PÉRIODE DE CHARGE. — On rappelle certains résultats qualitatifs en présentant sur la figure 5 une séquence visualisée de fusion. Le fluide chaud circule de bas en haut, à température donnée, dans un échangeur plan noyé dans le matériau fusible, l'acide stéarique, dont les propriétés thermophysiques sont voisines de celles de l'anhydride phtalique.

On observe d'abord la formation d'une fine couche liquide, le long de la paroi chauffante. Dans cette première phase de la fusion, le transfert de chaleur est essentiellement conductif. L'apparition d'effets convectifs et le développement de couches limites le long de la

Fig. 4. — Position des thermocouples dans le stockage.
[Coordinates of thermocouples in the storage.]

Fig. 5. — Profil de fusion en géométrie plane.
[Progress of melting front in plane geometry.]

paroi chaude et de l'interface liquide-solide entraînent des vitesses de fusion différentes dans les sections horizontales. Le front de fusion s'incline et une stratification en température s'établit dans le liquide [2, 3].

4.1.1 *Evolution des températures et profil de fusion.* — La fusion est réalisée après homogénéisation de la température du stockage vers 125 °C, valeur voisine du point de fusion $T_F \simeq 131$ °C, de façon à s'affranchir de la conduction dans le solide qui n'est pas prise en compte dans le modèle. L'évolution des températures dans les sections 2 et 3, sur les plans X_0 , X_{14} et X_{28} est donnée sur la figure 6. Les courbes mettent en évidence l'inclinaison du front de fusion par rapport à la verticale, on constate une légère dissymétrie suivant l'axe horizontal, due à la variation de la température du fluide caloporteur le long de la plaque.

La stratification du liquide formé, caractéristique d'un régime de couche limite, apparaît nettement sur les courbes : gradient vertical de température et température uniforme dans les plans horizontaux. On retrouve le même type de profil de fusion que celui observé sur la figure 5 ; en particulier, la présence de nombreuses retassures dans la zone supérieure du stockage et la phase de renoyage de l'échangeur résultant de la variation de volume lors du changement de phase, induisent une première zone de fusion préférentielle à une hauteur intermédiaire de l'échangeur, sur une profondeur (suivant x) de l'ordre du cm. Ce phénomène ne s'estompe qu'après débordement du liquide sur la partie supérieure du matériau fusible. Il apparaît que les corrélations donnant les différents régimes de convection dans les cavités rectangulaires semblent s'appliquer en présence d'un processus de fusion :

- régime de conduction pour $Ra < 250$
- régime de transition pour $270 < Ra < 2\,500$
- régime de couche limite pour $Ra > 2\,500$

où Ra est le nombre de Rayleigh défini par :

$$Ra = \frac{g\beta \Delta T}{\nu a_1} x_F^3$$

et $l = H/x_F$ élanement de la cavité de hauteur H et d'épaisseur x_F .

4.1.2 *Bilan thermique de l'énergie stockée et coefficient d'échange de fusion.* — L'énergie stockée est calculée à partir du bilan enthalpique du matériau fusible et du bilan thermique sur l'eau.

Une fraction de la chaleur est dissipée en fuites thermiques Q_f . Les fuites sont estimées à partir des températures de surface relevées en divers points sur l'isolant et des corrélations classiques d'échange en convection naturelle dans l'air ambiant. La courbe de variation de l'énergie cédée Q_c est représentée sur la figure 7. Le tableau III donne les valeurs de bilans thermiques au temps $t = 260'$, le débit d'eau étant de 1 185 l/h. Les écarts observés correspondent à l'incertitude sur le débit ($\pm 5\%$).

Tableau III. — Bilans thermiques de charge.

[Heat balance of charge.]

Bilan enthalpique	Bilan caloporteur	Bilan fuites	Energie stockée
Q_H	Q_c	Q_f	$Q_c - Q_f$
26 kWh	26 kWh	1,5 kWh	24,5 kWh

Remarque : Le bilan enthalpique, sur 525 kg du matériau fusible, est de 27,5 kWh, le fond du réservoir sur une épaisseur de l'ordre de 3 cm n'est pas fondu.

Fig. 6. — Evolution des températures au cours de la période de charge $T = 125$ °C.
[Temperatures evolution during charge.]

Fig. 7. — Evolution de l'énergie stockée Q_c , écart de température $T_p - T_F$. Coefficient échange de fusion H_c .

[Heat balance evolution Q_c , temperature difference $T_p - T_F$. Heat transfer fusion coefficient.]

Coefficient d'échange global de fusion. — Sur la figure 7 on a superposé à la courbe de variation de l'énergie l'écart de température $T_p - T_F$ et le coefficient d'échange de fusion h_c : T_p est la température moyenne de la plaque 2 définie par :

$$T_p = \frac{T_e + T_s}{2}.$$

Pendant la phase de fusion, la part des chaleurs sensibles, solide et liquide mise en jeu est relativement faible.

Dans ces conditions, on peut caractériser l'échange par un coefficient global de fusion h_c :

$$h_c = \frac{\varphi}{T_p - T_F}.$$

On suppose que le flux φ et la température moyenne de paroi T_p sont représentatifs de la section milieu de la plaque 2 équidistante des sections 2 et 3. Les données expérimentales sont portées dans le tableau IV.

La décroissance du coefficient d'échange en début de fusion montre que le transfert s'effectue d'abord par conduction à travers la couche limite formée (par ailleurs il faut remarquer que la température d'entrée d'eau n'est pas initialement égale à 148 °C). Le coefficient d'échange se stabilise rapidement à une valeur constante de l'ordre de 55 W/m² °C pendant la progression du front de fusion jusqu'au plan médian X_{28} à la cote $H = 187$ mm pour les sections 2 et 3.

Tableau IV. — Coefficient d'échange global de fusion. [Heat transfer fusion coefficient.]

t min.	W/m^2	$T_p - T_F$ °C	h_c W/m ² °C
10	750 5 %	4	187
20	— —	11,75	64
30	— —	11,75	64
40	— —	13	58
50	— —	13	58
60	— —	13	58
70	— —	13,5	55
80	— —	—	—
90	— —	—	—
100	— —	—	—
110	— —	—	—
120	750 —	—	—
130	680 —	—	50
140	630 —	—	47
150	580 —	—	44
160	490 —	13,75	36
170	450 —	13,75	33
180	320 —	15	21

Le flux échangé décroît ensuite à partir du temps $t = 140'$, l'écart de température $T_p - T_F$ n'est plus caractéristique de l'échange (surchauffe et stratification du liquide).

4.2 ETUDE DE LA PÉRIODE DE DÉCHARGE. — On détermine l'évolution de la température de sortie pour des conditions de déstockage données. Le débit nominal d'eau pour échanger 1 200 W_{Th} en maintenant un écart de température entrée-sortie constant et égal à 6 °C est de 180 l/h. Les fuites thermiques, malgré une isolation soignée, sont de l'ordre de 350 W et représentent 30 % de la puissance échangée, il est alors apparu souhaitable d'effectuer les essais à différents débits de 1 200 à 300 l/h pour diminuer la valeur relative des fuites.

D'autre part, nous avons préféré maintenir la température d'entrée du fluide caloporteur sur le stock constante et de l'ordre de 120 °C, ce qui implique une décroissance continue de la puissance. (Les valeurs expérimentales de la température d'entrée seront reproduites comme conditions d'entrée dans le modèle afin de prendre en compte les données réelles d'expérience.)

4.2.1 Analyse d'un essai à 300 l/h. — 4.2.1.1 Evolution des températures dans le matériau calostockeur et profil de solidification. — L'intérêt des courbes de température de décharge présentées sur la figure 8 est de montrer les différents régimes successifs du transfert de chaleur et l'évolution du croûtage le long d'une plaque d'échange. Pour plus de clarté, on a porté uniquement les températures le long de l'axe médian horizontal dans les trois plans de mesures X_0, X_{14}, X_{28} .

On observe une désurchauffe homogène de la phase liquide jusqu'à une température de l'ordre de 129 °C, et ceci quel que soit le débit exploré. Les courbes mettent

Fig. 8. — Evolution des températures sur l'axe médian dans les plans X_0 , X_{14} , X_{28} .

[Temperatures evolution on central axis in the planes X_0 , X_{14} , X_{28} .]

Fig. 9. — Evolution de la température de sortie du déstockage $Q = 300 \text{ l/h}$.

[Outlet temperature evolution in discharge.]

en évidence un léger gradient de température entre les thermocouples de la plaque (plan X_0) et ceux au sein du liquide à température homogène. Le transfert de chaleur pendant cette première phase de déstockage s'effectue par convection libre.

La légère surfusion amorcée, cesse avec l'apparition du solide et la température se stabilise entre $129,5$ et $130,5$ °C. Le transfert de chaleur devient alors purement conductif ($t \approx 60'$).

4.2.1.2 Evolution de la température de sortie. —

Les courbes de la figure 9 donnant les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur sur les plaques 2 et 3 (voies 3 et 4 et voies 5 et 6).

On constate une décroissance rapide de la température de sortie pendant la phase de désurchauffe du matériau fusible liquide jusqu'au temps $t \approx 60 \text{ min}$. La température se stabilise ensuite vers $127,5$ °C avec l'apparition du solide qui se dépose à l'entrée des échan-

geurs, la résistance thermique globale reste pratiquement constante car une partie de la surface d'échange est encore baignée par le liquide. Au temps $t \simeq 90$ min., le solide couvre toute la surface, la température de sortie décroît alors régulièrement avec l'augmentation progressive de la résistance thermique.

5. Modélisation et comparaison avec les résultats expérimentaux. — 5.1 MODÉLISATION DU PROCESSUS DE FUSION. — L'observation expérimentale directe fait clairement apparaître la prédominance de l'effet convectif (convection naturelle) sur la conduction dans le mécanisme des échanges thermiques. Nous avons cherché à développer une méthode numérique qui tienne compte des trois phénomènes suivants :

- présence des couches limites laminares chaude et froide respectivement sur la paroi d'échange et sur l'interface liquide-solide
- stratification en température de la phase liquide
- forme dissymétrique du front de fusion.

5.1.1 *Représentation des couches limites.* — Nous utilisons la méthode de Raithby et Holland [4], ce choix est orienté principalement par la simplicité de la formulation, d'autres modes de représentation plus précis peuvent toutefois être envisagés.

Cette méthode est du type intégral, son originalité consiste à utiliser un certain nombre de résultats déduits des solutions exactes d'Ostrach relatives au développement des couches limites sur des plaques planes verticales à température uniforme [5].

5.1.2 *Stratification en température de la phase liquide.* — Ce processus résulte de l'apport respectif vers le haut et vers le bas de liquide chaud et froid par l'intermédiaire des couches limites. Le calcul utilise un découpage en domaines élémentaires horizontaux de la zone liquide. Sur chacun de ces domaines, le bilan thermique instantané fixe l'accroissement en température pendant le pas de temps dt choisi.

5.1.3 *Progression du front de fusion.* — L'évaluation du flux thermique local instantané sur l'interface liquide-solide fixe le déplacement du front de fusion $d\delta$ sur un intervalle de temps dt suivant l'expression :

$$\varphi dt = \rho [\Delta H_F + C_{pl}(T_\infty - T_F)] d\delta$$

(T_∞ étant la température du liquide au point de cote verticale considéré.)

On calcule ainsi pas à pas le déplacement en tout point du front liquide-solide.

Remarques. — Le calcul n'est valide que si l'espace liquide est suffisamment large pour permettre le développement des couches limites. Il ne prend pas en compte la phase d'apparition du film liquide où subsiste le régime de conduction, ni celle du régime pseudo-conductif où le front liquide-solide reste parallèle à la paroi d'échange et où se développent des cellules de convection. La phase de formation du film liquide est traitée par un calcul de conduction en

utilisant une méthode du type Karman et Polhausen (profil de température stationnaire) ou par une approche numérique.

5.1.4 *Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle de fusion.* — La température de la paroi chaude est prise égale à 145 °C, valeur voisine de la température moyenne de la plaque 2 qui évolue pendant la phase de fusion de 144 à 146 °C.

On compare sur la figure 10 les valeurs estimées et expérimentales de l'énergie stockée en fonction du temps et du coefficient d'échange de fusion. L'écart relevé sur les coefficients d'échange expérimentaux et calculés est inférieur à 15 %.

La figure 11 donne l'évolution calculée de l'interface solide-liquide et le profil de température dans le liquide en fonction de la hauteur à différents temps de 5' en 5'. La comparaison avec la figure 6 permet d'apprécier la vitesse de propagation du front.

5.2 MODÉLISATION DE LA DÉCHARGE. — Le modèle de décharge a déjà fait l'objet d'une description dans un rapport D.G.R.S.T. [6], nous en rappelons seulement les possibilités et les hypothèses de base.

Fig. 10. — Evolution de l'énergie stockée Q . Coefficient d'échange fusion H_c .

[Heat balance evolution Q . Heat transfer fusion coefficient H_c .]

Fig. 11. — Evolution de l'interface solide-liquide et profils de température.

[Interface liquid-solid evolution and temperature profile.]

Il permet de déterminer l'évolution de la température de sortie du fluide caloporteur et la répartition des épaisseurs de matériau fusible solidifié de façon à optimiser l'accumulateur en surface et volume pour des conditions de déstockage données.

L'hypothèse principale consiste à supposer l'établissement d'un profil de température de régime stationnaire dans l'épaisseur solidifiée, la comparaison avec des solutions numériques a montré que cette approximation est justifiée et se révèle d'autant meilleure que le nombre de Stefan est petit, ce qui est le cas ici : $St \approx 0,1$.

L'épaisseur croûtée est ainsi considérée comme une simple résistance thermique, on tient compte cependant de la chaleur sensible mise en jeu par la variation de la température moyenne de cette phase solide. De même, si la surchauffe initiale est importante, on fait intervenir la chaleur sensible liquide correspondante en considérant une désurchauffe uniforme de la phase liquide et en fixant un coefficient d'échange à l'interface de solidification.

5.2.1 Exploitation du modèle. — L'exploitation du modèle, indépendamment des données géométriques du stockage, nécessite la connaissance des paramètres suivants :

— Le coefficient d'échange dans le matériau fusible liquide est pris égal au coefficient d'échange global de fusion déterminé expérimentalement : $60 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

— Le coefficient d'échange du fluide caloporteur est calculé à partir d'un nombre de Nusselt de 4,5 ou par la relation de Colburn pour les nombres de Reynolds de l'écoulement supérieurs à 2 500.

L'évolution de la température de sortie du fluide caloporteur en fonction du temps et le bilan thermique de déstockage calculés sont comparés aux résultats expérimentaux pour les différents débits explorés dans le tableau V et sur la figure 12 pour un débit d'eau de 590 l/h.

Tableau V. — Bilans thermiques expérimentaux et calculés.

[Calculated and experimental heat balances.]

$q \text{ l/h}$	t_h	Q_{exp} kWh $\pm 5 \%$	Q_{est} kWh
300	12	19	18,8
413	11	18	18
590	5,18'	12	11,8
590	3,30'	10	9,8
880	2,45'	11	10
1 160	2,08'	8,5	8,3

Compte tenu de la précision sur les débits de l'ordre de $\pm 5 \%$, on peut constater que l'accord est excellent.

La comparaison des résultats expérimentaux et théoriques montre que l'approximation d'un profil de température de régime stationnaire dans l'épaisseur solidifiée est justifiée. Par ailleurs, des comparaisons avec des solutions numériques nous ont permis de situer l'erreur résultant du choix d'un profil approché pour des conditions de décharge très diverses. Pour un nombre de Stefan faible ≤ 1 , la vitesse de propagation du front solide est suffisamment lente pour permettre une relaxation complète du profil de température. Nous avons aussi constaté que l'hypothèse d'une désurchauffe homogène du liquide est correcte.

6. Conclusion. — L'étude des matériaux calo-stockeurs favorables, tant d'un point de vue thermocinétique qu'économique, a permis de mettre en évidence, dans la gamme 100 à 150 $^\circ\text{C}$, un produit prometteur : l'anhydride phthalique.

Fig. 12. — Evolution de la température de sortie du déstockage $Q = 590$ l/h.

[Outlet temperature evolution.]

Deux autres produits organiques, en cours d'essais, étendent cette gamme jusque vers 200 °C. On peut encore espérer dépasser de quelques dizaines de degrés cette limite, toujours avec des produits organiques.

Un dispositif de stockage expérimental de taille significative (525 kg) d'anhydride phtalique a permis d'analyser le comportement détaillé du système, lors des phases de stockage (fusion) et de déstockage (solidification).

Les programmes de calcul concernant la modélisation de la période de décharge ont été testés de manière satisfaisante. On peut, à partir de ces programmes, optimiser une surface d'échange dans les diverses géométries de base. Il est possible d'introduire des conditions variables de température d'entrée et de vitesse du fluide caloporteur en fonction du temps. On dispose donc d'un outil de calcul simple permettant d'estimer l'influence des différents paramètres et de traiter rapidement un problème de

déstockage. Rappelons par ailleurs, qu'un modèle avec vaporisation du fluide caloporteur est opérationnel.

La période de charge, complexe, couplant les phénomènes de convection naturelle dans la phase liquide formée et le déplacement du front de fusion, a été traitée de façon originale à partir d'analyses de problèmes de convection naturelle dans les cavités. Les résultats obtenus sont satisfaisants, l'écart relevé entre les coefficients d'échange expérimentaux et calculés est inférieur à 15 %. Dans le développement ultérieur du modèle, il sera envisagé la prise en compte de conditions limites de charge plus générales et la description analytique du début de fusion.

Enfin, l'étude nous a permis de chiffrer le coût d'investissement du kWh_{Th} stocké, de l'ordre de 400 F pour une application de ce type (surface d'échange en aluminium ou en acier et réservoir en acier); l'enceinte de stockage représentant près de 70 % du coût.

Bibliographie

- [1] Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente de fusion dans la gamme 100 à 150 °C. Contrat D.G.R.S.T. Décision d'aide 79.7.003.
- [2] SPARROW, E. M., PATANKAR, S. V., RAMADHYANI, S., Analysis of melting the presence of natural convection in the melt region. *Trans. Asm.* **99** 520-526 (1977).
- [3] BARDON, J. P., DELAUNEY, D., VRIGNAUD, E., Etude expérimentale de la fusion et de la solidification périodique d'une plaque de paraffine. *Revue générale de thermique XVIII* (1979) n° 212-213.
- [4] RAITHBY, G. D., HOLLAND, K. G. T., General method of obtaining approximate solution to laminar and turbulent free convection problem. *Adv. Heat Trans. Acad. Press*, II (1975) 265-315.
- [5] OSTRACH, S., *Nat. Adv. Aeronaut.* Rep. IIII (1953).
- [6] CHABANNE, J., BRICARD, A., Etude de comportement global d'une unité de stockage thermique par changement de phase. Modélisation des phases de charge et de décharge. Contrat D.G.R.S.T. Décision d'aide 79.7.0095.
- [7] BRICARD, A., CHABANNE, J. et MANIFICAT, A., Etude et essai d'un générateur de vapeur à accumulation utilisant la soude comme matériau de stockage. *Revue Générale de thermique XVIII* (1979) n° 212-213.