



utilisant la chaleur latente est dicté par les performances des matières disponibles et des échangeurs de chaleur associés. Les matériaux à changement de phase les plus convenables sont ceux possédant la propriété de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume, de bonnes propriétés thermiques, aussi bien qu'une stabilisation acceptable des phases sans la possibilité d'un sous refroidissement [2].

Le but de cette étude est d'examiner le comportement de transitoire d'une unité de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente, constituée d'un lit fixe de forme cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune de la cire de paraffine (température de fusion = 60°C) utilisée comme matériau à changement de phase et traversé par de l'air (préalablement chauffé durant le stockage et ambiant lors du déstockage) maintenu à une température d'entrée variable. D'autre part, notre contribution consiste à évaluer les performances dynamiques (durée de stockage, la température de sortie (sans dimension),  $T^*$  et le rendement thermique,  $\eta$  d'un tel système de stockage.

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental permettant l'étude du stockage et la récupération de la chaleur utilisé, Fig.1, est constitué d'un cylindre de 0.6m de hauteur et 0.20 m de diamètre orienté verticalement, rempli de sphères en plastiques de diamètre égal à 0.038 m, disposées au hasard contenant chacune de la cire de paraffine (température de fusion = 60°C) et isolé thermiquement par de la laine de verre. Un ventilateur centrifuge prélève l'air ambiant et le fait propulsé à travers l'enceinte de stockage. Cet air est d'abord chauffé au moyen de résistances électriques. La vitesse de circulation est mesurée au moyen d'un débitmètre.

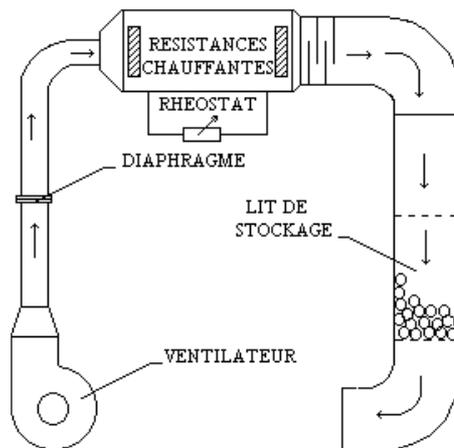


Figure. 1: Montage expérimental

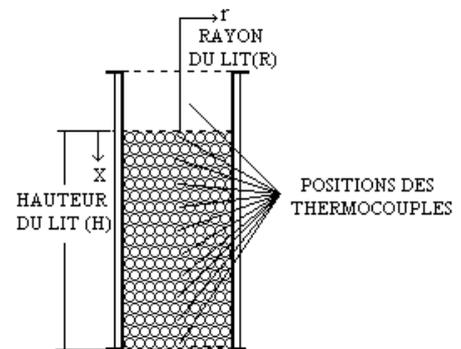


Figure. 2: Disposition des thermocouples dans le lit de stockage

Un enregistreur assure la mesure à la fois de la température de l'air et du matériau. La mesure des températures le long du lit est effectuée par douze thermocouples de type K (cuivre /constantan) de diamètre 1mm et de précision 0.5 °C (Fig. 2) Les températures de l'air à l'entrée et à la sortie du lit sont aussi mesurées.

## 3. EQUATIONS MATHÉMATIQUES

Les équations de conservation de l'énergie qui régissent le phénomène de stockage / déstockage de la chaleur dans un lit fixe de forme cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un MCP sont déduite du modèle de Schumann [3,4]. Ces équations sont basées sur les hypothèses suivantes : (a) les parois du lit sont adiabatiques, (b) l'influence de la paroi du cylindre est négligée; (c) le phénomène est unidirectionnel; (d) la vitesse moyenne d'écoulement du fluide est

constante dans tout le lit; (e) la conduction entre les particules sphériques est ignorée; (f) les gradients de températures sont faibles à l'intérieur des particules sphériques. Ces équations s'écrivent pour un modèle mono dimensionnel à deux phases séparées:

- pour le fluide:

$$\frac{\partial T}{\partial x} + k_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{k_2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{k_3} (\Theta - T) \quad (1)$$

- pour le MCP:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{\omega} (T - \Theta) \quad (2)$$

Ces équations ne tiennent compte que de la dispersion thermique axiale. Elles sont discrétisées à partir d'un maillage spatial et temporel de pas respectivement égaux à  $\Delta x$  et  $\Delta t$ . Pour leur résolution, nous avons utilisé une méthode purement implicite des différences finies [5,6].

## 4. LES PERFORMANCES DU LIT

### 4.1 Durée du stockage, $\tau$

Elle est définie comme le temps nécessaire au lit pour atteindre l'état de saturation thermique

### 4.2 Température de sortie (sans dimension), $T^*$

Pour normaliser la présentation des résultats dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur, la température de sortie peut être exprimée comme la différence entre la température de l'air à l'entrée et sa sortie, divisée par la variation totale de la température

$$T^* = \left| \frac{T_e - T_s}{T_e - T_a} \right| \quad (3)$$

### 4.3 Rendement thermique, $\eta$

Le rendement thermique du lit est défini comme le rapport entre la quantité d'énergie stockée (ou récupérée) et la capacité de stockage théorique (CST) du lit pendant le temps  $\tau$ .

$$\eta = \int_0^t \left( T^* \pm \frac{\text{chaleur perdue}}{\text{CST}} \right) dt = \int_0^t \left( T^* \pm \frac{L_1 (T_{fm} - T_a)}{Gc_f \Delta T_0} \right) dt \quad (4)$$

Le rapport, chaleur perdu / CST, est un terme de correction, dont le signe est choisi en fonction du mode considéré. Ainsi pour le mode stockage, cette quantité doit être additionnée à  $T^*$  et retranchée en mode déstockage.

## 5. RESULTATS ET DISCUSSION

### 5.1 Température de sortie, $T^*$

Les variations de  $T^*$  avec le temps sans dimension,  $\tau$  pour les deux modes de stockage et de récupération et pour un débit d'air ( $Re$ ) variable sont représentées sur les figures 3(a) et 3(b).

On peut voir que pour des débits faibles ( $Re$ ), la réponse du système . Comme la vitesse superficielle est petite pour les faibles débits ( $Re$ ), les pertes d'énergie par la sortie du lit de stockage sont minimales, conduisant seulement à une chute lente de  $T^*$  durant le processus de changement de phase. Pour des débits plus importants, la vitesse superficielle est grande et le temps parcouru par l'air à l'intérieur du lit

de stockage devient très court. Ce qui fait qu'une grande proportion d'énergie est perdue par la sortie et une décroissance rapide de la température est observée.

Les figures 4(a) et 4(b) illustrent la comparaison respectivement en mode stockage et déstockage des valeurs prédites de la température de sortie adimensionnelle et ceux mesurées expérimentalement. La comparaison montre un bon accord entre les valeurs calculées et les résultats expérimentaux.

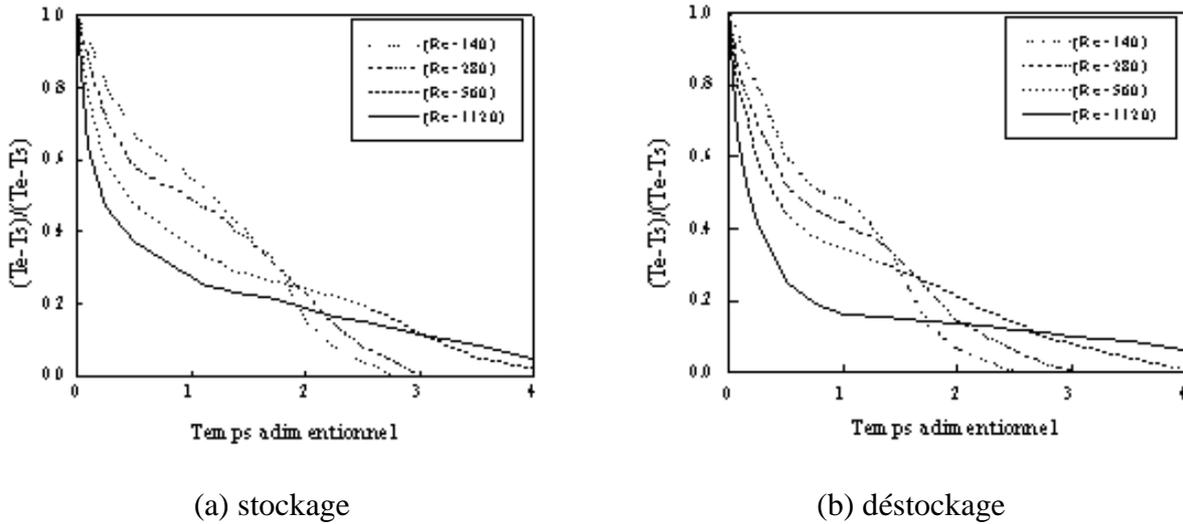


Figure.3: température de sortie adimensionnelle en fonction du temps pour différents Re

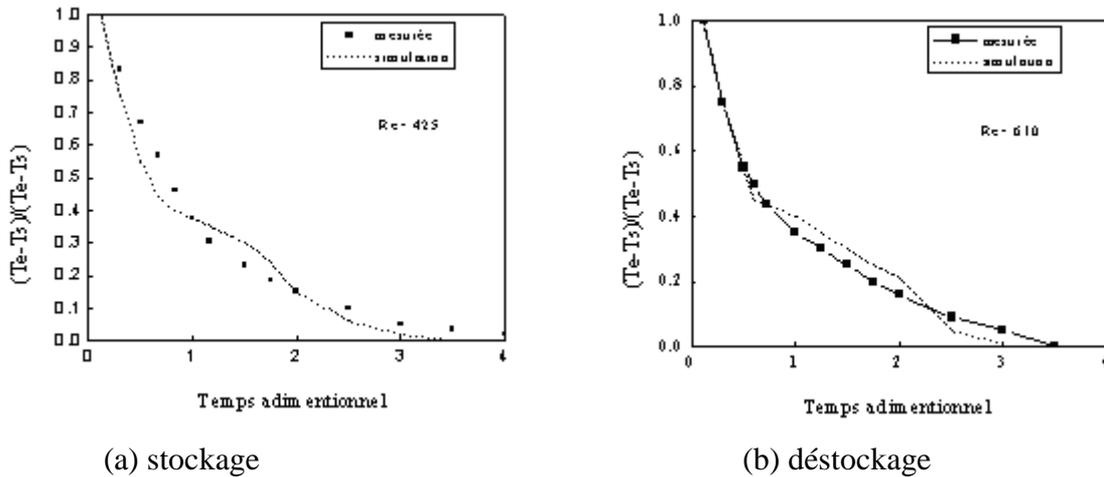


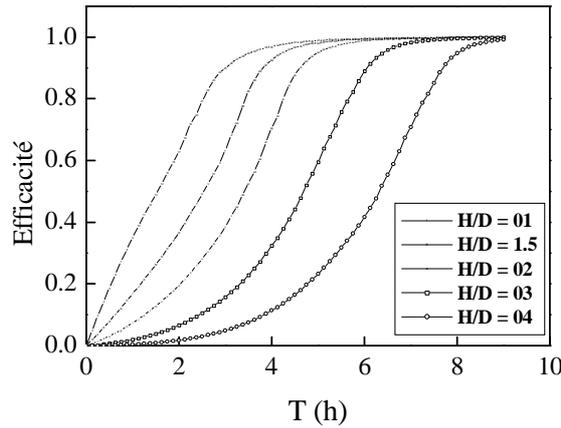
Figure.4: Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées de la température de sortie adimensionnelle

### 5.2 Rendement thermique, $\eta$

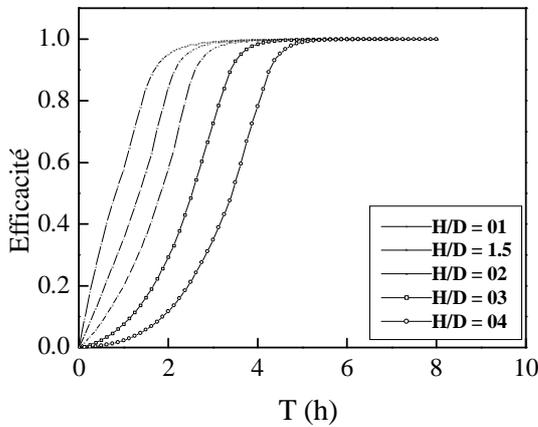
Nous avons représenté sur les figures 5(a), 5(b) et 5(c) le rendement du lit durant la période de stockage pour un rapport hauteur/diamètre du lit (H/D) variant de 1 à 4 et un débit d'air (Re) variable.

La tendance générale de toutes ces figures est que l'efficacité du lit durant le stockage diminue avec H/D. C'est dû au fait que le volume de stockage augmente avec H/D et par conséquent plus de chaleur est nécessaire au lit pour augmenter sa température et son efficacité de stockage. Aussi, on peut remarquer que pour un temps donné et une même valeur de H/D, le rendement augmente avec Re (débit d'air). De

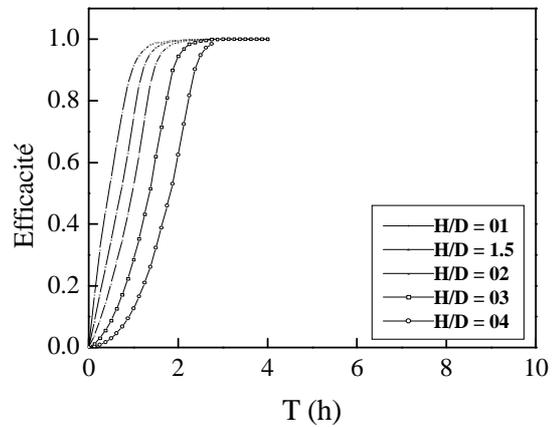
plus ces figures indiquent que pour toutes les valeurs de H/D, la durée du stockage (temps nécessaire au lit pour atteindre sa température maximum, correspondant à l'état de saturation thermique) diminue avec Re (débit d'air). C'est dû au fait que comme plus d'air chaud est introduit dans le lit, plus de chaleur est stockée dans le système et ce qui par conséquent fait croître le coefficient de transfert de chaleur entre le fluide en mouvement et les particules sphériques.



(a) Re = 225



(b) Re = 450



(c) Re = 900

Figure.5 : Variation du rendement du lit durant le stockage pour différents H/D et Re

**CONCLUSION**

Dans cette étude, nous avons procédé à une analyse des performances du stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente à basses températures dans un lit fixe rempli de sphères uniformes contenant chacune un matériau à changement de phase traversé par un flux d'air.

Pour cela un modèle théorique unidimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Il a permis de prédire les performances qui caractérisent un tel système de stockage telle que la durée du stockage et l'efficacité du lit. Ce modèle peut être appliqué pour les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur pour des conditions du fluide à l'entrée constantes et un nombre de Reynolds variable.

Les résultats obtenus ont permis de montrer que le rapport longueur/diamètre du lit a une influence notable sur les performances du lit, d'une part, et, d'autre part, que le débit d'air est de loin le paramètre le plus sensible durant ce processus de stockage de l'énergie thermique. Un stockage qui s'effectue par ailleurs de façon plus efficace dans les zones situées loin de l'entrée.

## REFERENCES

- [1] J. Duffie & W. Beckmann, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Welly and Son. New York (1980)
- [2] A. Abhat, low temperature latent heat thermal energy storage, *Solar Energy*, 30, 1983, pp313-332
- [3] D.E. Beasley & C. Ramanarayan, Thermal Response of Packed Bed of Spheres Containing a Phase Change Material. *Int. J. Energy Research* 13 (1989), 253-265
- [4] A. Benmansour M.A. Hamdan, &A. Bengueddach, Experimental and Numerical Investigation of Solid Particles thermal energy Storage Unit. *Applied thermal engineering*, 26 (2006) 513-518.
- [5] V. Patankar, *Numerical Heat transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington DC (1980)
- [6] V.R. Voller, Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems, *Numerical Heat Transfer Part B*, (1990), 17, 155-169