



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: 0421/23456
CABLE: CENTRATOM - TELEX 480392-1

SMR/112 - 6

IV^e SEMINAIRE SUR L'ENERGIE SOLAIRE

(10 - 21 septembre 1984)

STOCKAGE DE L'ENERGIE SOLAIRE

A. DONNADIEU
Laboratoire de Spectroscopie
Université des Sciences et Techniques
du Languedoc
Place Eugène Bataillon
34060 Montpellier
France

Ces notes sont préliminaires. Vous trouverez les copies qui vous manquent et des supplémentaires au Bureau 231.

STOCKAGE DE L'ENERGIE SOLAIRE

A. DONNADIEU USTL MONTPELLIER.

CARACTERES SPECIFIQUES DE L'ENERGIE SOLAIRE

DILUEE

INTERMITTENTE
ALEATOIRE

BESOINS ET CONSOMMATION

CONTINUUS OU PERIODIQUES
NIVEAUX ENERGETIQUES VARIABLES
FORMES D'ENERGIE VARIABLES (Thermiques, Electri-
ques, mécaniques
etc. - - -)

- DEPHASAGE DANS LE TEMPS ENTRE
FOURNITURE et CONSOMMATION D'ENERGIE
- DEPHASAGE DANS LA QUANTITE et LE NIVEAU
ENTRE FOURNITURE et CONSOMMATION



STOCKAGE

DIFFERENTS TYPES DE STOCKAGE

- mécanique
- Electrique (Electromagnétique)
- chimique
- Thermo chimique
- Thermique.

STOCKAGE MECANIQUE

- pompage hydraulique-remplissage de réservoirs situés en altitude
- Air comprimé (Turbine \rightarrow compresseur)
- Inertie (Machines Tournautes)

STOCKAGE ELECTRIQUE

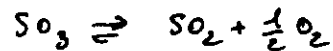
- Photovoltaïque \Rightarrow batteries, accumulateurs
- stockage à très basse température : supraconducteurs magnétiques (stockage électromagnétique).

STOCKAGE CHIMIQUE

- Hydrogène (H_2 - Solutions alcalines de soude ou potasse) électrolyse
 - Stockage en nappe aquifère
 - Stockage en phase liquide ou fortement comprimée
- Biomasse : Stockage par photosynthèse

STOCKAGE THERMOCHEMIQUE

- Réactions chimiques réversibles à hautes températures (600 - 1000°C).



STOCKAGE THERMIQUE

Grand domaine de températures dépendant du type du système de captation utilisé.

jusqu'à 100°C
Basses températures

Capteurs plans

- chauffage
- réfrigération
- séchage

100 < t < 300°C
Moyennes températures

Concentration linéaire

- processus calorifiques agricoles ou industriels

300°C < t < 1000°C
hautes températures

Concentration focale

- Génération d'électricité, processus thermiques

1000°C < t
très hautes températures

||

- Cycles thermodynamiques à t° plus élevées que précédemment pour augmenter le rendement

Types DE STOCKAGE

- Par chaleur sensible : (élévation de température d'un matériau sans changement de phase)

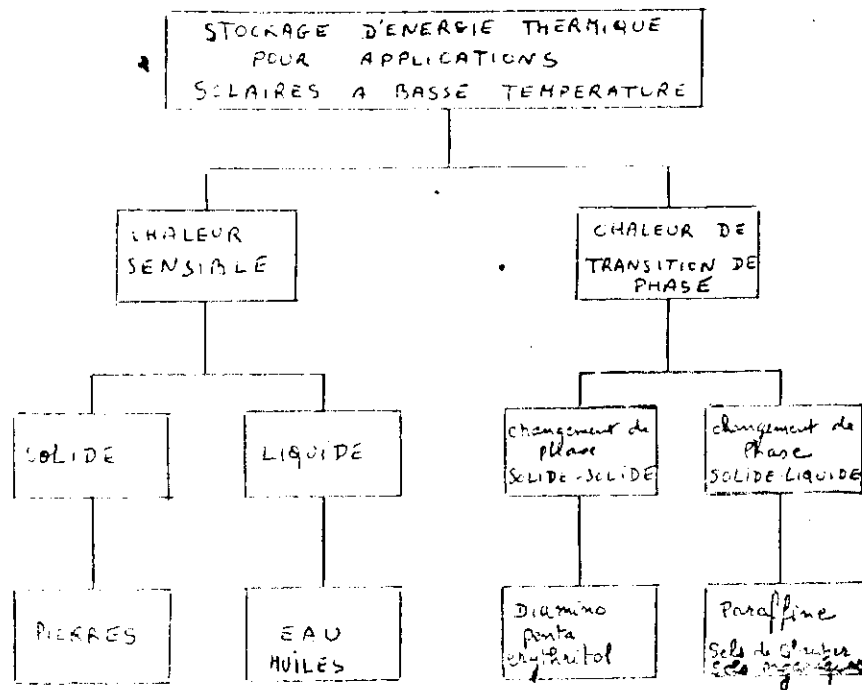
Systèmes actifs : nécessite de pompe ou ventilateur pour le transfert de chaleur du collecteur à l'endroit de stockage et d'utilisation

Systèmes passifs : fluide caloporteur se déplace par convection naturelle (thermosiphon)

- Par chaleur latente : (changement de phase du matériau stockeur)

Avantage : réduction significative du volume du matériau de stockage

Inconvénients : besoins d'échangeurs complexes et containers résistants à la corrosion.



Techniques principales pour le Stockage d'énergie Thermique

Propriétés des Systèmes de Stockage.

- Compacts : g^{de} Capacité de Stockage / unité de masse ou volume (chaleur spécifique - chaleur latente)
- Uniformité des températures : Absence de stratification thermique
- Capacité de charge et décharge sous grand taux de transfert sans grand gradient de température
- Capacité à supporter un g^{d} nombre de cycles (charge/décharge) sans perte de performance et de capacité de Stockage
- pertes négligeables avec l'environnement
- longue vie
- bon marché

A. CRITERES THERMODYNAMIQUES

- point de fusion dans le domaine de température considéré
- grande chaleur latente de fusion par unité de masse \equiv moins de matériau pour une quantité d'énergie donnée
- grande densité \equiv petit contenant
- chaleur spécifique élevée
- conductivité thermique élevée \equiv gradients de T° pour la charge et la décharge petits
- point de fusion congruent \equiv le matériau doit fondre complètement = compositions identiques du liquide et du solide
- petits changements de volume durant la transition de phase

B. CRITERES CINETIQUES

- petit ou inexistant retard à la solidification au cours du refroidissement.

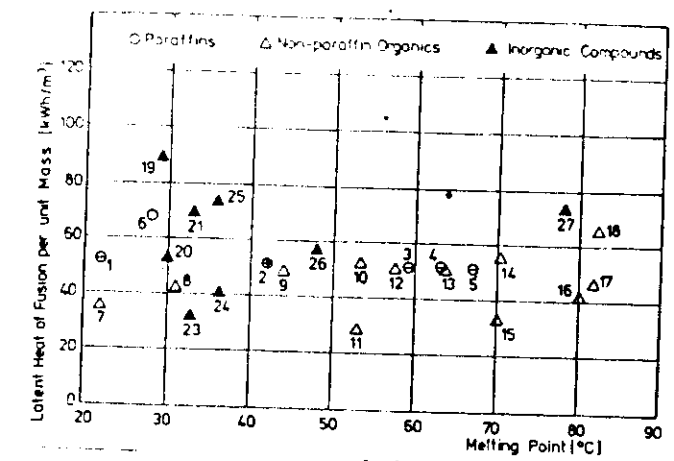
C. CRITERES CHIMIQUES

- stabilité chimique
- aucune décomposition chimique
- aucune corrosion vis-à-vis des matériaux de construction
- non poison, inflammable, non explosif

D. CRITERES ECONOMIQUES

- Disponible en grande quantité
- bon marché

PROPRIETES DESIRABLES DES MATERIAUX DE
STOCKAGE PAR
CHALEUR LATENTE (CHANGEMENT DE PHASE).



- a. Paraffins
- 1 Paraffin
 - 2 Paraffin
 - 3 Paraffin
 - 4 Paraffin
 - 5 Paraffin
 - 6 Octadecane
- b. Organic Compounds
- 7 Capric Acid
 - 8 Polyglycol E500
 - 9 Lauric Acid
 - 10 Myristic Acid
 - 11 Polyglycol E4000
 - 12 Loxol G32
 - 13 Palmitic Acid
 - 14 Stearic Acid
 - 15 Biphenyl
 - 16 Naphthalene
 - 17 Propionamide
 - 18 Acetamide
- c. Inorganic Compounds
- 19 $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
 - 20 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
 - 21 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
 - 22 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
 - 23 $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
 - 24 $\text{Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
 - 25 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
 - 26 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - 27 $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

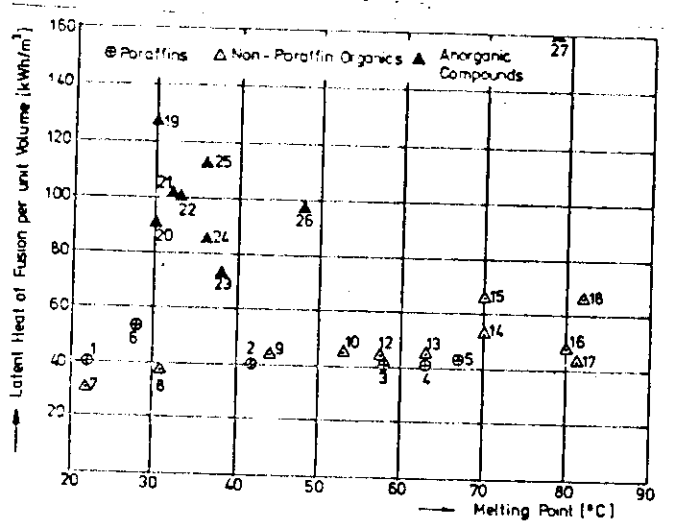


Fig. 11(a), (b): Latent Heat of Fusion per Unit Mass and per Unit Volume of Selected Phase Change Heat Storage Materials in the Temperature Range 20 - 80°C

chaleur latente de fusion par unité de masse et par unité de volume de matériaux de stockage dans le domaine de température 20 - 80°C

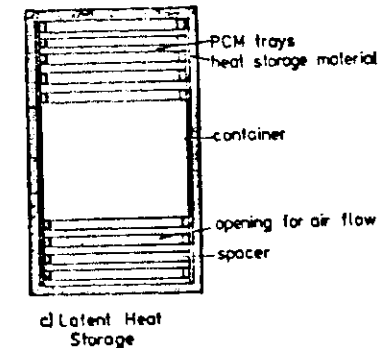
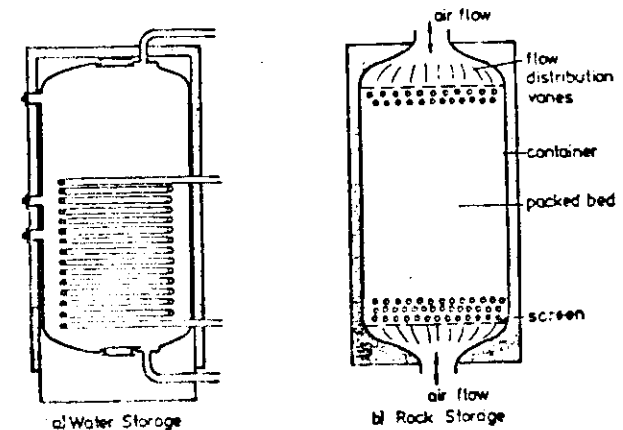
COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS MILIEUX DE STOCKAGE

	Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par chaleur latente
	eau	Pierres	Solides - liquides
- Domaine de température	0 - 100°C	large	large. dépend du choix du matériau
- chaleur spécifique	haute	basse	moyenne
- conductivité thermique	basse	basse	très basse, propriété isolante
- Capacité de stockage thermique par unité de masse et unité de volume pour de petites différences de température	basse	basse	haute
- Stabilité aux cycles thermiques	bonne	bonne	généralement mauvaise
- Disponibilité	partout	presque partout	dépend du choix du matériau
- Coût	bon marché	bon marché	cher
- Géométrie	simple	simple	complexe
- Gradient de T° durant la charge et la décharge	grand	grand	petit
- Effet de stratification thermique	difficile à éviter	existent mais faibles partiellement	généralement non existant
- charge et décharge instantanée	possible	impossible	possible avec sélection d'échangeurs de chaleur
- Intégration au système de chauffage, ou réfrigération, ou air	directe avec le système à eau	directe avec le système à air	indirecte
- Coût pour pompes, ventilateurs etc.	bas	haut	bas
- Corrosion	peu étendue	non corrosive	peu d'informations
- Vie	grande	grande	peu d'informations

quelques Matériaux pour stockage à
Températures moyennes

Température maximum d'utilisation	Fournisseur	Désignation	Vitesse circulation à 90°C	
400 °C	ENSAE Poulenc	Gilotherm OMP	20	64 cm
		Gilotherm OM 1	20	5
	Monsanto	Gilotherm OMD	20	5
		Sanotherm VPI	150	3,6
370 °C	ICI France	Sanotherm A8	PF 143 °C	
		Caswell TR 154		
340 °C	ENSAE Poulenc	Gilotherm DU	20	4,2
		Gilotherm DM	20	98
	Monsanto	Sanotherm 56	20	95
	ICI France	Thermox	30	3,13
315 °C	ICI France	TOTAL Solinda	20	92
	V.F.R.	SN 3200	20	34
	H&B	Marketherm S	20	34
		Marketherm S	20	34
300 °C	B.P.	Thermal 80	20	135
	EH	Thermal 22	20	65
		Thermal 100	20	5
	Fina France	Caloran P 68	20	205
	H&B	Marketherm L	20	3,4
	Mobil Française	Marketherm 505	20	75
	Monsanto	Sanotherm 55	20	75
		Sanotherm 60	20	9
	ENSAE Poulenc	Gilotherm ALD	20	97
	Shell	Thermal E	20	480
	W. L. G. Siphon	Ducal 350	20	35
	Avlar	Makala T 32	40	32
		Makala T 68	40	68
	B.P.	Thermal 85	20	95
	Esso	Essotherm 100	20	70
	Fina France	Caloran P 72	20	30
		Caloran P 32	20	72
	ENSAE Poulenc	Gilotherm PW	20	68

Appendix : Comparison between Water Storage, Storage in Rock Beds and Latent Heat Storage in Phase Change Materials



Matériaux pour stockage à température élevée

		T _F (°C)	T _{eb} (°C)
- Métaux fondus : (liquides entre 400-800°C) Accumulateurs	Aluminium	658	2500
	Baryum	710	1630
	Magnésium	657	1102
	Zinc	419	906
- Fluides Caloporteurs	Sodium	98	883
	étain	231	2430
	Plomb	327	1750

- Sels fondus
présentent des problèmes de
corrosion de la t°

Carbonates
Nitrates
chlorures

Comparison de milieux différents de stockage de chaleur

Table A.11. Comparison of Various Heat-Storage Media

(Stored Energy = 10^6 kJ = 300 kWh; $T = 15^\circ\text{C}$)

Property	Heat Storage Material	Sensible Heat Storage		Latent Heat Storage	
		Rock	Water	Organic Phase Change Materials	Inorganic Phase Change Materials
Latent Heat of Fusion kJ/kg		-*	-*	190	230
Specific Heat kJ/kg		1.0	4.2	2.0	2.0
Density kg/m ³		2260	1000	800	1600
Storage Mass for Storing 10^6 kJ kg		67000	16000	5300	4350
Relative Mass [†]		15	4	1.75	1.0
Storage Volume for Storing 10^6 kJ m ³		30	16	6.6	2.7
Relative Volume [†]		11	6	2.5	1.0

*latent heat of fusion is not of interest for sensible heat storage

†relative mass and volume are based on latent heat storage in inorganic phase change materials

Accumulateurs à très hautes températures

Sels fondus seraient corrosifs pour les matériaux environnants

- Solides réfractaires
- Fluides caloporteurs : Air ou gaz

Systèmes passifs :

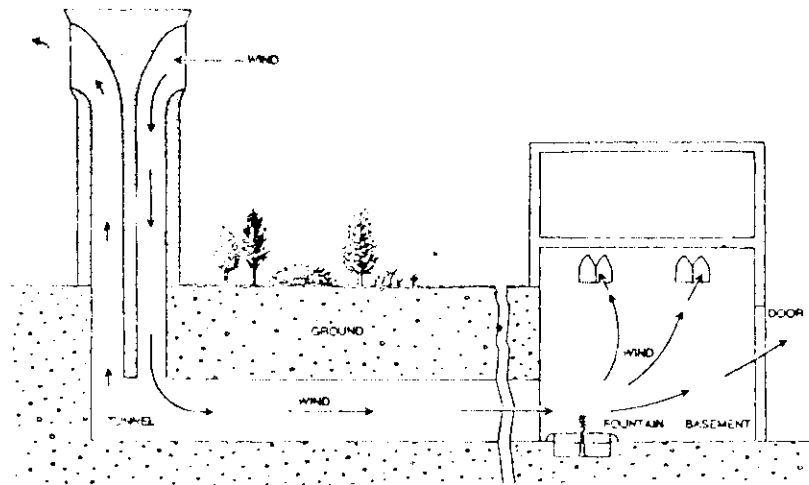
- Mur Trombe
- Diode Thermique
- Lit de Pierres (chauffage de parois latérales)
- Bassins solaires



- Bassins à gradient de concentration saline
- évaporation passive
- densification passive

CONCLUSION

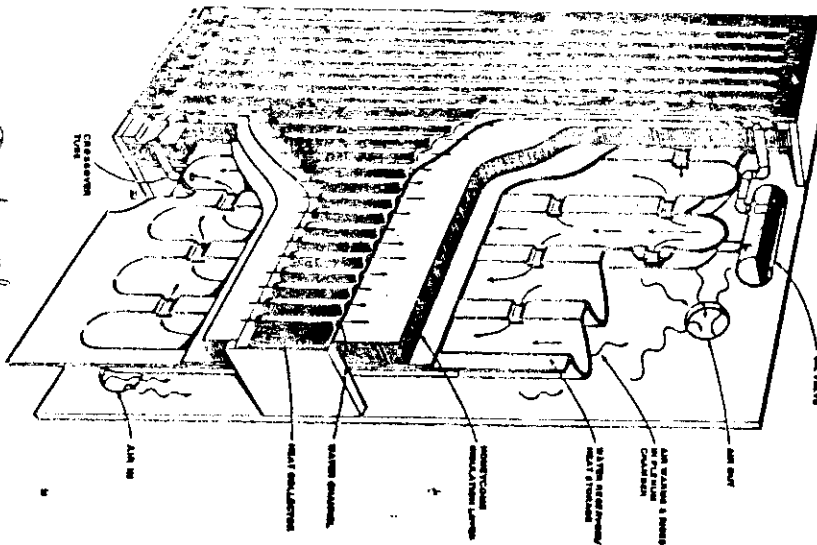
quelque soit sa forme, on ne saura jamais surestimer le rôle du stockage de l'énergie



Drawing of Passive Cooling System Incorporated into an Architectural Design in Iran.
climatization passive

References

- Roger DUMON *Energie solaire et stockage d'énergie*
 Masson 1979
- *Revue de Physique Appliquée "Energie Solaire" 17 n°9 1982*
- *Recherches du CEA sur le stockage de longue durée de l'énergie solaire* EDF 1978
- *Comptes Rendus 2^{ème} Séminaire sur l'Energie Solaire* Trieste 1980
- *Comptes Rendus 3^{ème} Séminaire sur l'Energie Solaire* Trieste 1982
- *Comptes Rendus 1^{er} Séminaire on Solar Energy Storage* Trieste Septembre 1978
- H. TELKES *Thermal Energy Storage in Salt Hydrates*
Sol Energy Mat. 2 (1980) 381.



Diode Thermique
 Schematic of Thermic Diode Solar Panel. From *Mechanix Illustrated* 72 (583), 31 (December 1976).

