

Le **STOCKAGE THERMIQUE**  
un **outil avantageux** pour la **flexibilisation**  
des **moyens de production de chaleur bois-énergie**  
(appliqué aux réseaux de chaleur **urbains** et **industriels**)

**Sébastien VESIN**

*CEA Grenoble - Direction des Énergies (DES)*

*Laboratoire des Composants et Systèmes thermiques*

[\*Sebastien.vesin@cea.fr\*](mailto:Sebastien.vesin@cea.fr)

# CEA – Liten



**1000**  
Employees



**160 M€**  
Budget



**+ 200**  
Industrial partners



**200**  
Publications/year



**180**  
PhD students  
et post-doc



**12**  
Platforms



**+ 200**  
Institutionnal projects



**+ 1 900**  
Patent portfolio

**4**  
DIVISIONS



**Solar & Grids**  
Chambéry / Cadarache  
≈ 300 p.



**Electromobility**  
Grenoble  
≈ 250 p



**Advanced materials  
and structural  
electronics**  
Grenoble  
≈ 200 p



**Hydrogen, thermal  
engineering & e-fuel**  
Grenoble / Chambéry / Cadarache  
≈ 250 p

**Ingénierie Thermique**  
**Tech-économique &  
environnemental**  
**Cycle du carbone**

# CEA – Liten : Activités Thermiques et Tech-économiques

## SUJET

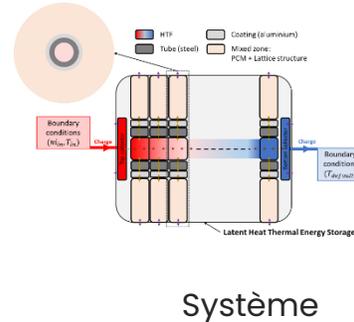
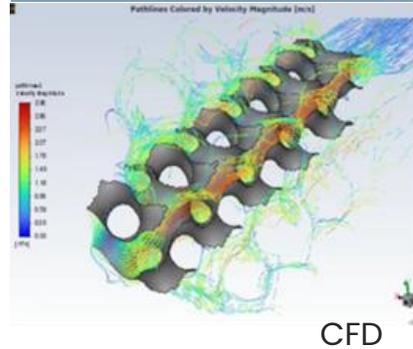
Décarbonation de l'industrie et des territoires :

- Efficacité énergétique,
- Flexibilisation des moyens de production ENR&R,
- Optimisation technique économique et environnementale des systèmes.

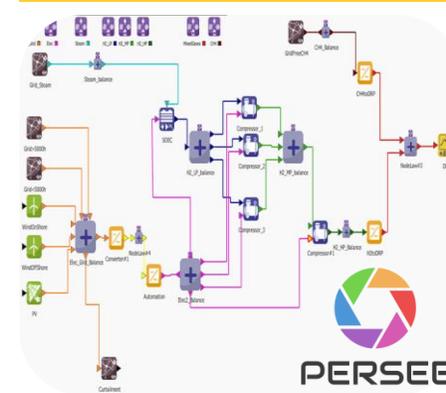
## CHIFFRES CLÉS :

- 15 millions d'euros d'investissements
- 75 ingénieurs et techniciens, 40 jeunes chercheurs (thèses, post-doc, stages, CDD)
- Portefeuille de 80 brevets

## Modélisation composants et systèmes



## Analyse tech-économique et environnemental



- **Tech-Eco-Env** databases & Component Model Libraries
- **Operating Strategies**
- Optimization methods & **sensitivity analysis**
- Co-simulation from **design to demonstration & control**

## Plateforme thermique

**3 sites** (*Grenoble, Chambéry, Cadarache*)  
1 500 m<sup>2</sup> de locaux et 5 ha de démonstrateurs

**Boucles d'essais** thermo hydrauliques :  
Vapeur 450 °C / 120 bar, eau surchauffée / vapeur, huile thermique, air.

**Caractérisation** et validation expérimentale :

- Stockages thermiques,
- Unités de valorisation de chaleur fatale,
- Echangeurs / encrassement (liquide, gaz),
- Machines thermodynamiques.



# Contexte

Le bois-énergie est la 1<sup>ère</sup> source de chaleur renouvelable en France (≈64%)

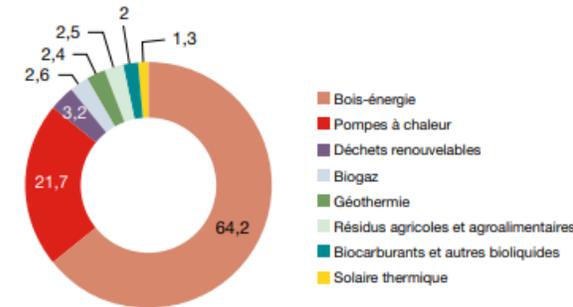
**MAIS...** Les moyens de production de chaleur bois-énergie présentent des **contraintes** et **limitations** de fonctionnement :

- **Minimum technique élevé** ≈30% Pmax
- **Variation de charge lente** (ramp-up/down) ≈3%/min et une inertie thermique importante
- Impacts et **risques induits** par une **température d'entrée plus basse** que la consigne :
  - **Risque de corrosion** (point froid, condensation de composés corrosifs),
  - **Inconvénients des solutions déployées** pour y remédier :

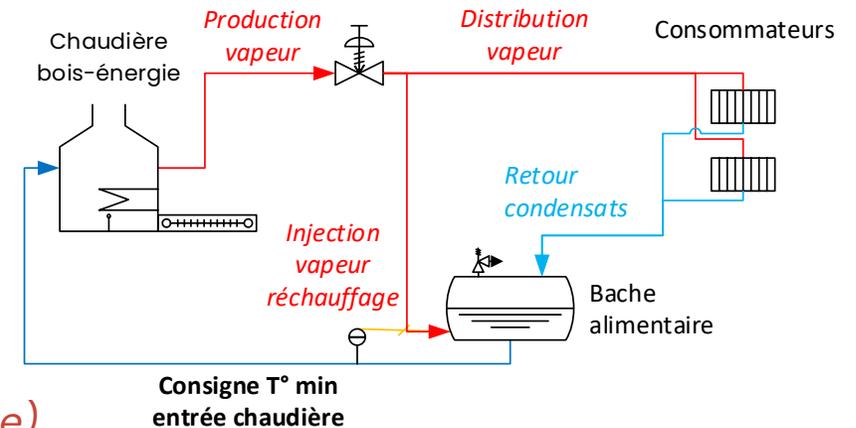
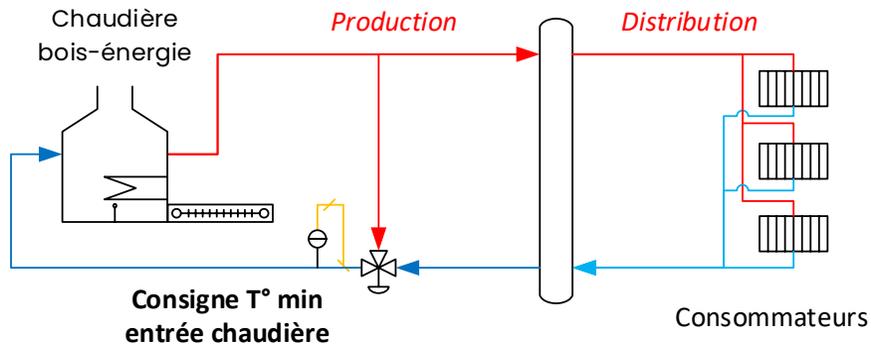
CONSOMMATION PRIMAIRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES POUR USAGE DE CHALEUR EN 2020 PAR FILIÈRE

TOTAL : 173 TWh

En % (données corrigées des variations climatiques)



Source : calculs SDES



→ Limite la puissance/vapeur distribuée (≠ puissance/vapeur produite)

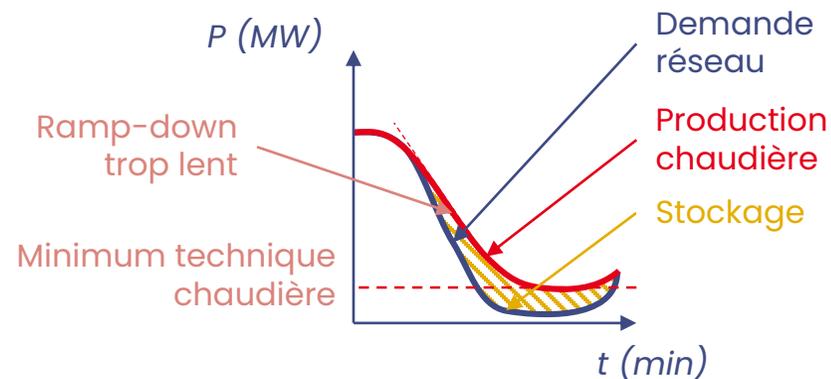
→ Dégrade l'exergie du système

**Enjeu** Flexibilisation des moyens de production de chaleur bois-énergie → **Stockage thermique**

Avant de rentrer dans la technique...

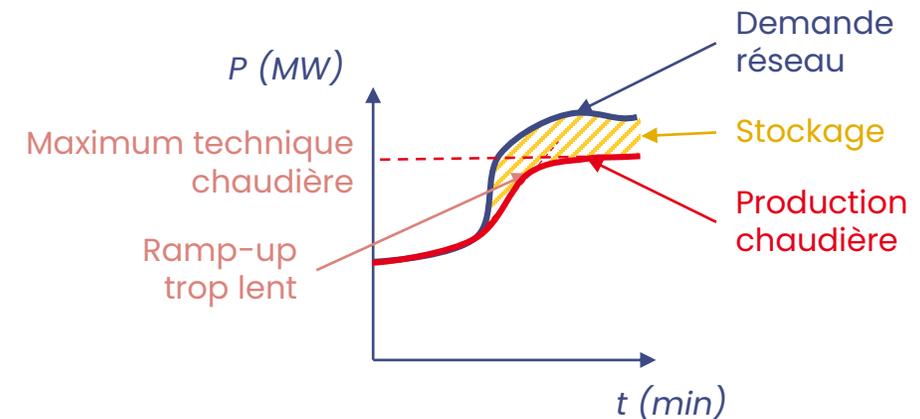
## Comment considérer avantageusement le stockage thermique suivant le service rendu attendu ?

### CAPACITÉ DE RÉSERVE



La **capacité de réserve** consiste à stocker un excédant de production de chaleur (ex : variation de charge trop lente, atteinte du minimum technique,...) pour la restituer ultérieurement.

### CAPACITÉ D'APPOINT



La **capacité d'appoint** consiste à suppléer un moyen de production pour satisfaire une demande ponctuelle (ex : variation de charge trop lente, atteinte de la puissance max) avec une chaleur stockée préalablement, afin d'éviter ou de limiter l'engagement d'un moyen de production d'appoint (souvent fossile).

→ *Le dimensionnement (capacité, puissance) du stockage thermique sera différent suivant le service rendu privilégié.*

# Sommaire

## Réseaux de chaleur urbains

60°C

110°C

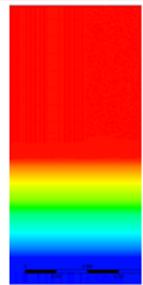
## Réseaux de chaleur industriels

180°C

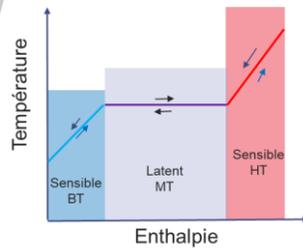
> 450°C



### 1. Stockage de chaleur, Caloporteur monophasique



Sensible

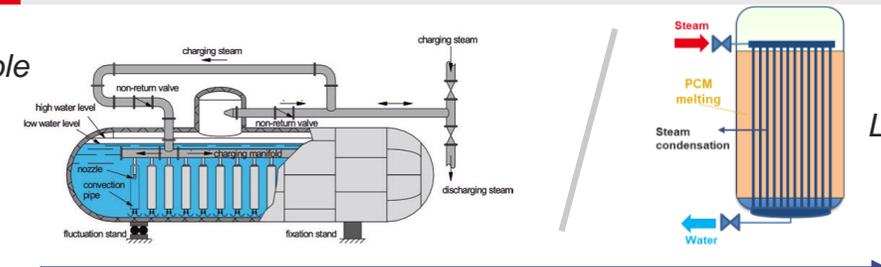


Latent

Mature (Développement) Recherche

### 2. Stockage de chaleur, Caloporteur diphasique (vapeur)

Sensible



Latent

Mature

Développement Recherche

### 3. Optimisation technico-économique et environnementale





# **1 ■ Stockage de chaleur (fluide caloporteur monophasique)**

# Réseaux de chaleur urbain – **Stockage thermique centralisé** (i.e. proche des moyens de production)

## Stockage de chaleur sensible atmosphérique



Stockage en eau atmosphérique (1000 m<sup>3</sup>, 2500 MWh/an) à Brest

Source : Dalkia

## Stockage de chaleur sensible pressurisé (eau surchauffée)



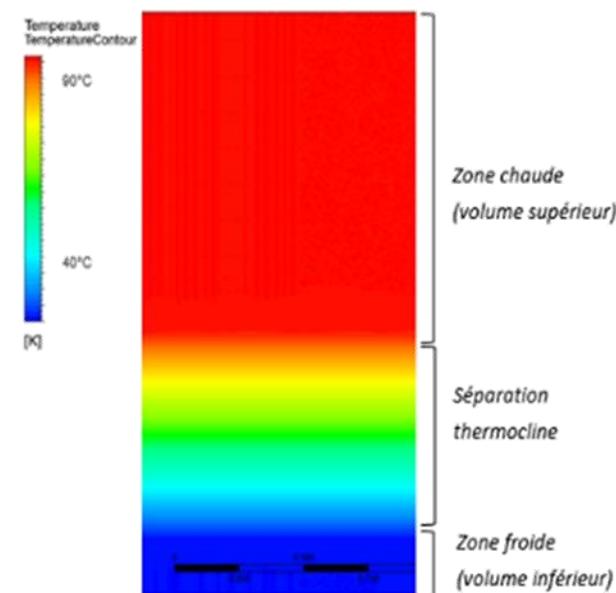
Stockage en eau surchauffée pressurisée (180°C, 22 bar) de la centrale Biomax à Grenoble

Source : Le Dauphiné libéré, CCIAG

### Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur sensible stratifié en température

*Effet thermocline*



**Maturité** Industrielle

**R&D**

La R&D porte essentiellement sur le **développement de système d'injection et de soutirage**, limitant le mélange en température (homogénéisation) pour **augmenter le taux de restitution** (i.e. thermocline fine)

# Réseaux de chaleur urbain – **Stockage thermique décentralisé** (i.e. sous-station\*, proche des consommateurs)

\*Classique et bidirectionnelle

## Principales contraintes

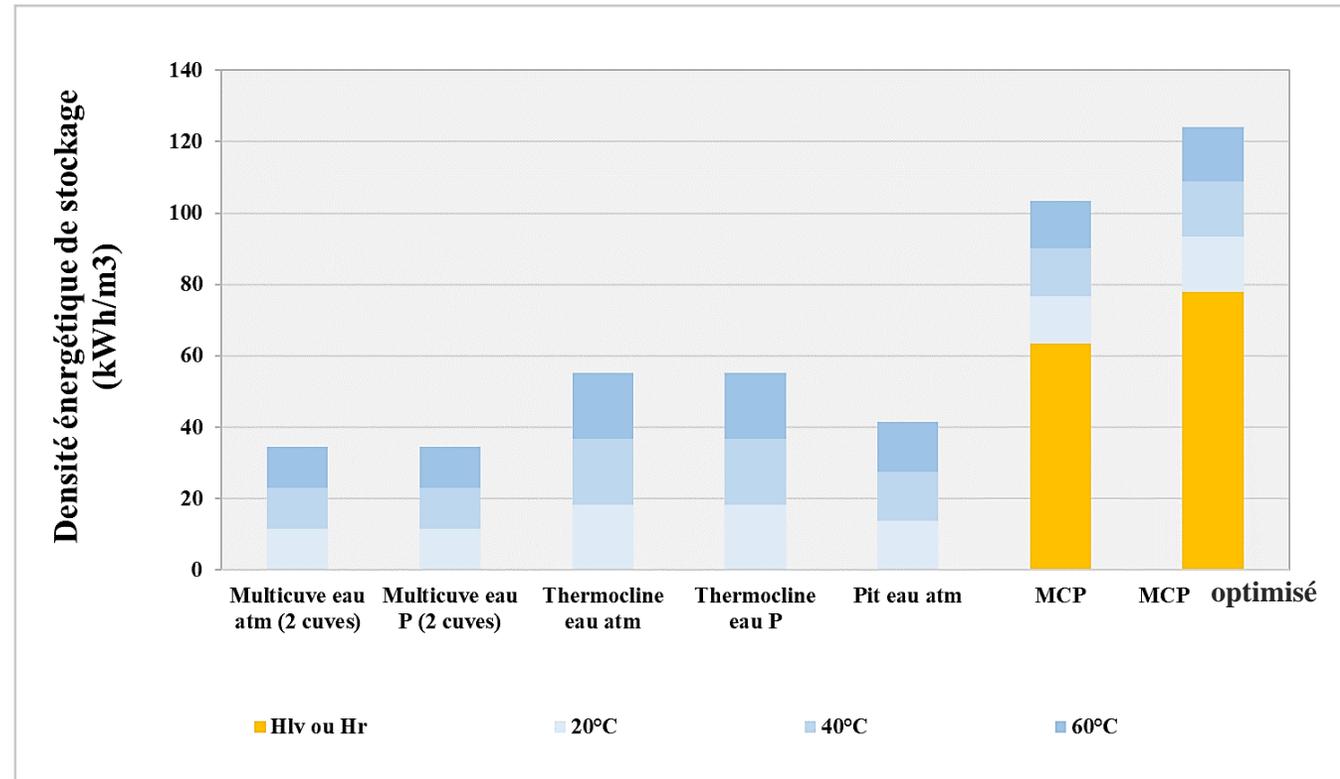
- Conditions d'**exploitation** (faible  $\Delta T_{in/out}$  et  $T^\circ$  de retour variable),
- Conditions d'**implantation** (faible espace au sol et hauteur disponible)

## Objectifs

- Atteindre une densité énergétique de stockage ( $kWh/m^3$ ) élevée sur un faible  $\Delta T_{in/out}$
- Conformable en forme et volume (modulaire)
- Comportement peu influencé par la  $T^\circ$  de retour

## Solution identifiée

→ **Stockage de chaleur latente (MCP)**



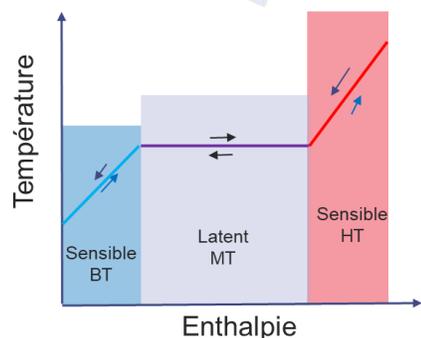
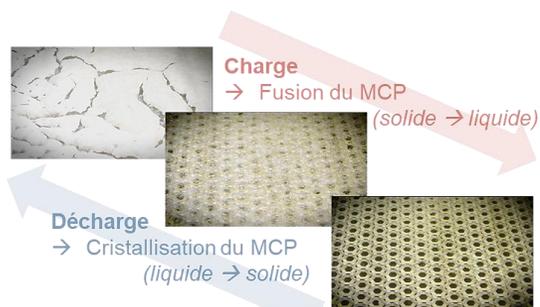
# Focus : Stockage de chaleur latente (MCP\*)

## Principe de fonctionnement

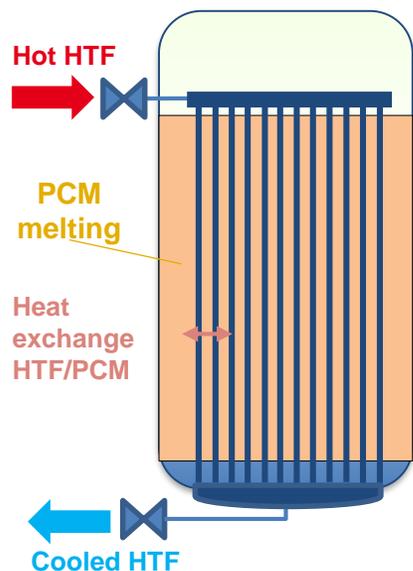
Le **fluide caloporteur** (eau) traverse l'**échangeur thermique** et échange sa chaleur avec le **Matériau à Changement de Phase\*** contenu dans la **calandre**.

L'**enthalpie de changement d'état solide-liquide du MCP** est exploitée pour stocker la chaleur :

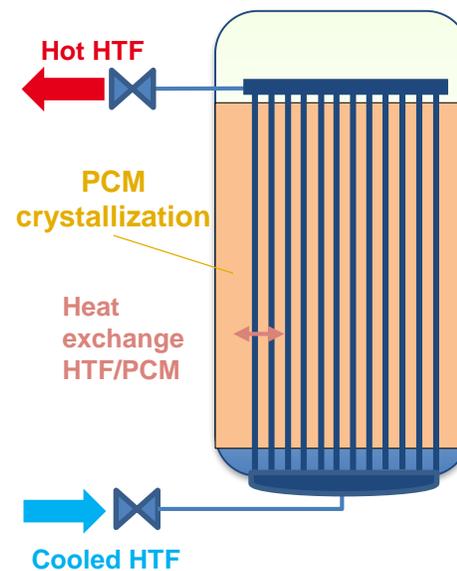
- **Charge** = Refroidissement de l'eau → **Fusion du MCP**
- **Décharge** = Chauffage de l'eau → **Cristallisation du MCP**



## Charge of LHTES



## Discharge of LHTES



## Principaux avantages

- ✓ **Densité énergétique de stockage élevée** ( $\approx 70 \text{ kWh/m}^3$ )
- ✓ **Faible volume pressurisé** (seulement l'échangeur)
- ✓ **Peu sensible** aux **variations de la température d'entrée (retour) de l'eau** (contrairement au stockage thermocline), lors de la **décharge**
- ✓ **Empreinte au sol faible** (densité énergétique élevée et peu contraint par la forme)

## Principaux inconvénients

- **Maturité R&D** (TRL 4 – 7)
- **Low conductivity of most PCM** (specific heat exchanger needed to transfer heat between PCM and HTF)
- **Selection of PCM** (according to the requirements of operating and environmental conditions)

# Réseaux de chaleur urbain – **Stockage thermique décentralisé** (i.e. sous-station, proche des consommateurs)

Démonstrateurs de stockage de chaleur latente (MCP), issus de la R&D :



Démonstrateur ZAC Flaubert Grenoble (CCIAG)

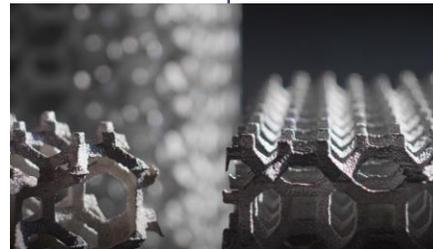
Source : CEA, CCIAG

Faisceau de tubes à ailettes

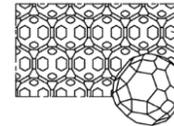
+ MCP bio sourcé



Structure Lattice moulée autour des tubes caloporteurs



Open (Kelvin) cell lattice structure made of cast aluminum alloy



Démonstrateur de GRIMSBOX, quartier Eureka (SERM)

Source : GRIMS Energies

**Maturité** Démonstrateurs

**R&D**

- **Design de l'échangeur thermique interne** avec un objectif d'**optimisation** du critère **performances-coût**,
- Développement permettant l'utilisation de **MCP biosourcés très denses énergétiquement** ( $\approx 100 \text{ kWh/m}^3$ ), y compris des MCP présentant des contraintes d'utilisation (surfusion,...)



# 2 ■ Stockage de vapeur

# Conventional industrial steam storage

## STEAM ACCUMULATOR (RUTHS)

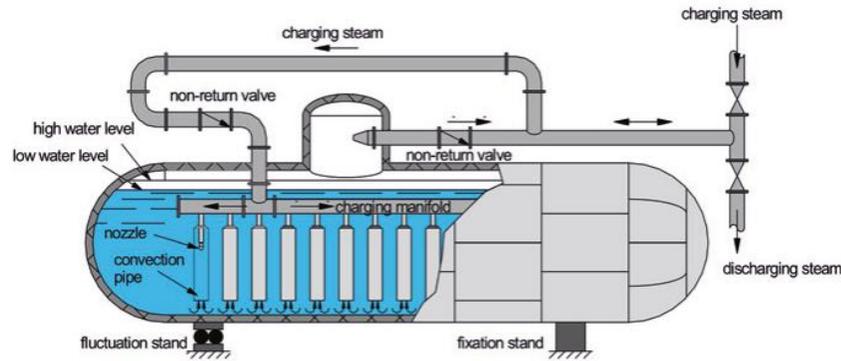


Fig. 5.1 Schematic of a sliding pressure steam accumulator

### Application

**Industry** (generally  $<200^{\circ}\text{C}$ )

**Concentrated solar power**

**District heating network**

#### Sources :

W.-D. Steinmann, Thermal Energy Storage for Medium and High Temperatures, Springer Nature 2022

Bosch : <https://www.boiler-planning.com>

### Principle

**Charge** : Steam is injected into a pressurized liquid water tank, causing it to condense; the proportion of the liquid phase increases, as do the temperature and pressure in the vessel.

**Discharge** : Extracting saturated steam via direct evaporation of the saturated liquid water, resulting in a reduction in reservoir temperature and pressure.

### Main drawbacks

- ✗ **High pressurized volume** (for a low volumetric energy density, e.g.  $20 \text{ kWh/m}^3$ )
- ✗ **Sliding pressure** (steam released at decreasing pressure)
- ✗ **Large footprint** (preferred horizontal arrangement)

# Development of new kind of steam storage

## STEAM – LATENT THERMAL ENERGY STORAGE (with PCM)

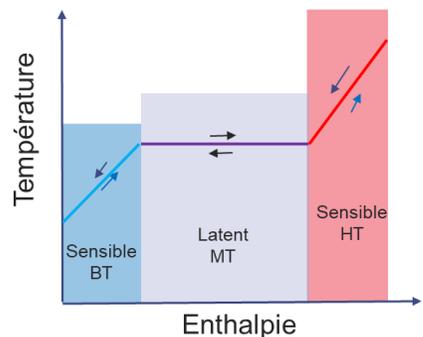
### Principle

**Steam-liquid water** goes through a **heat exchanger**, which is in contact with a **phase change material** (PCM) contained in a **shell**.

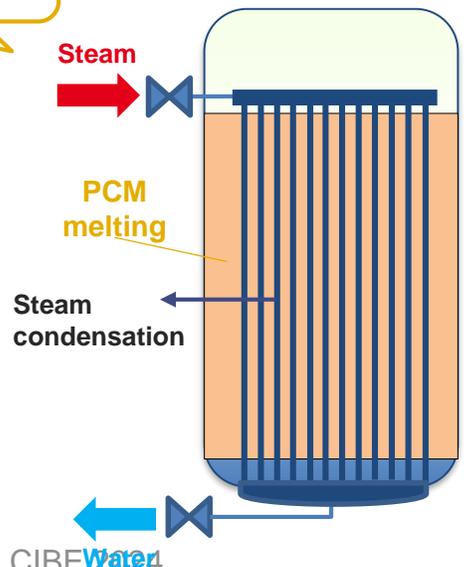
Solid-liquid phase change of a PCM is exploited :

- **Charge** = **Steam condensation** → **PCM melting**
- **Discharge** = **Saturated steam generation** → **PCM crystallization**

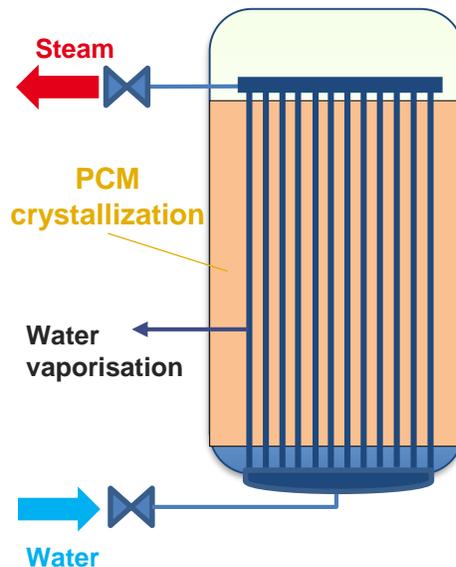
≈90% de l'énergie de la vapeur stockée à  $P_{atm}$



### Charge of LHTES



### Discharge of LHTES



### Main advantages

- ✓ **High volumetric energy density** ( $\approx 70 \text{ kWh/m}^3$ )
- ✓ **Low pressurized volume** (only heat exchanger)
- ✓ **Steam released** at almost **constant pressure**
- ✓ **Lower footprint** (high density and preferred vertical arrangement)

### Main drawbacks

- **R&D maturity** (TRL 4 – 6)
- **Low conductivity of most PCM** (specific heat exchanger needed to transfer heat between PCM and HTF)
- **Selection of PCM** (according to the requirements of operating and environmental conditions)

# Steam – LHTES conception and R&D

## ENHANCED CONCEPTION

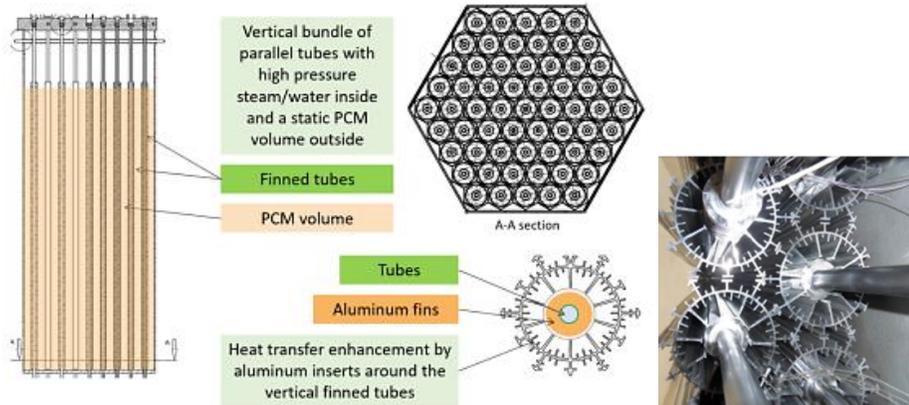
Extruded aluminum inserts around fin tubes

## CONVENTIONAL CONCEPTION

*e.g. Finned tubes & shell*

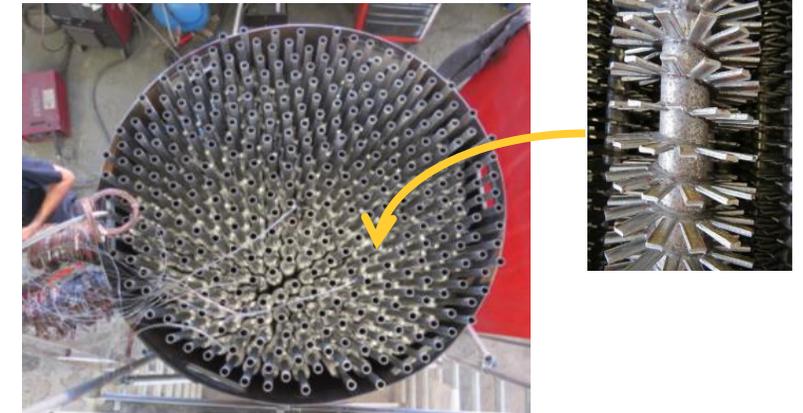


Steam-LHTES pilot (CEA)



- ✓ **Additional conductive element** (aluminum inserts) is **not related to tube diameter** → less amount of tubes :
  - ➔ Higher convective heat transfer coefficient
  - ➔ Fewer tubes welding operations
- ✓ **Low PCM heat transfer free-zone**
- ✓ (for pressurized HTF) **Lower pressurized volume**

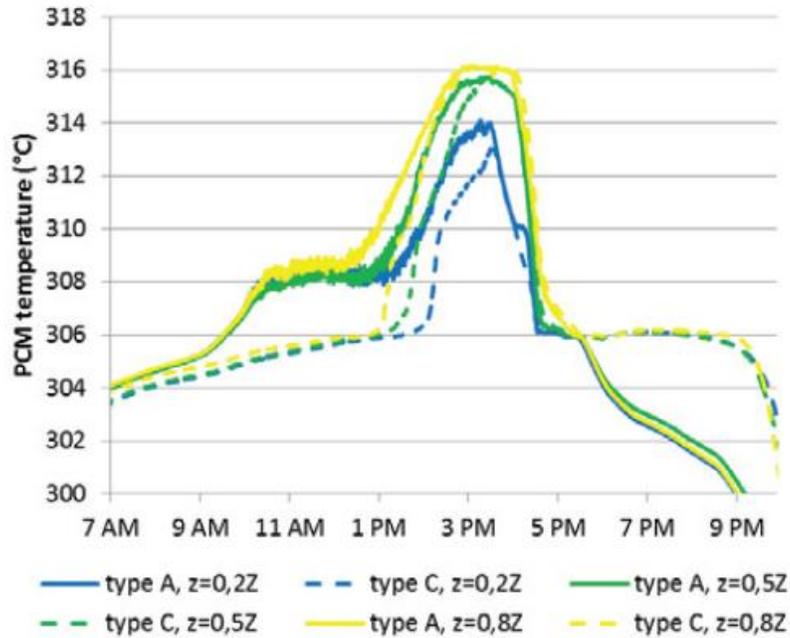
Patent :  
FR2996631 B1



- **Imposed finned tube dimensions** (industry standard)  
*high fins = large-diameter tube*
- Limited fin height leads to a **large amount of tubes** :
  - ✗ Low flow rate of HTF / tube → Low velocity  
→ **Low convective heat transfer coefficient**
  - ✗ **Very expensive construction**
  - ✗ PCM heat transfer free-zone
  - ✗ (for pressurized HTF) Large volume of hydraulic manifold and distributor → Pressure vessel

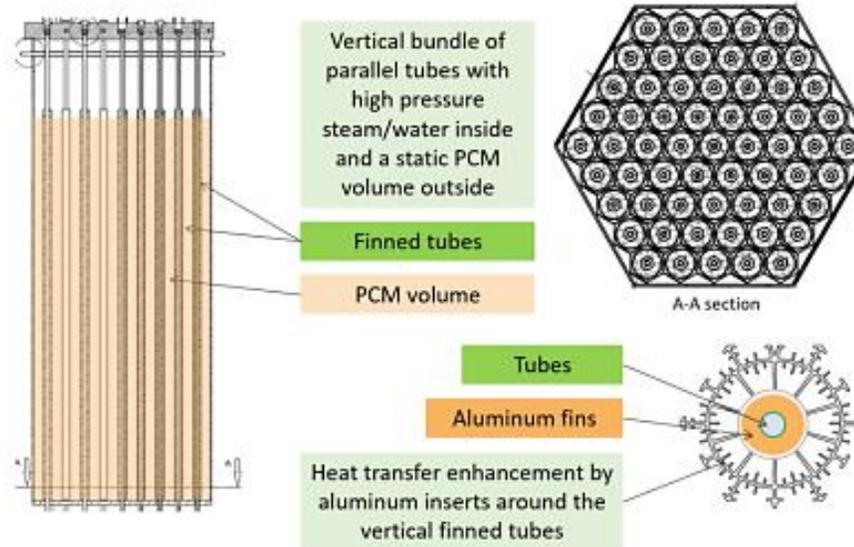
# Experimental results on the PCM storage pilot at CEA

Representative conditions of CSP unit (Concentrated Solar Power) – storage nearly 300°C



PCM temperature evolution simulating CSP conditions with :

- a full load charge ( $\approx 100$  bar)
- a complete discharge ( $\approx 75$  bar)



Z : total height of tubes  
 TC A ----- : temperature nearly the external surface of tubes  
 TC C - - - : temperature at equal distance between tubes (end of phase change of the PCM)

## Sources :

P. Garcia et al., Experimental and numerical investigation of a pilot scale latent heat thermal energy storage for CSP power plant, SolarPACES 2014

P. Garcia et al., Performances and control aspects of steam storage systems with PCM: Key learnings from a pilot-scale prototype, Applied Energy, 2022

# Comparaison avantages / inconvénients : Accumulateur vapeur vs Stockage de vapeur par MCP

## Accumulateur de vapeur

Restitution de la vapeur à **pression décroissante**

$$(P_{steam} = P_{sat}(T))$$

Densité énergétique de stockage

**≈20 kWh/m<sup>3</sup> (faible)**

Volume pressurisé **très élevé**

(tout le reservoir)

TRL : Industrial

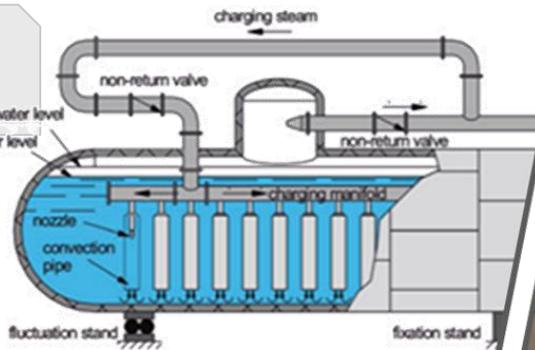


Fig. 5.1 Schematic of a sliding pressure steam accumulator

Empreinte au sol **très élevé**

(disposition horizontale privilégiée & faible densité énergétique)

Débit de vapeur restituée : limité par l'évaporation à la surface libre et par le ΔP de la vanne de régulation

## Stockage de vapeur par MCP\*

\*MCP : Matériaux à Changement de Phase

Restitution de la vapeur à **≈ pression constante**

$$(P_{steam} = P_{sat, water}(T) \text{ and } T \approx T_{cristallisation MCP})$$

Densité énergétique de stockage

**≈70 kWh/m<sup>3</sup> (élevé)**

Volume pressurisé **faible**

(échangeur thermique seulement)

TRL : R&D and Demonstration

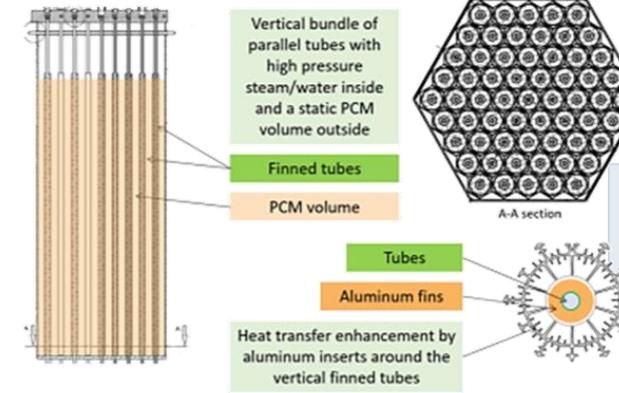


FIGURE 1. Picture (left) and schematic (right) of the PCM module tested

Empreinte au sol **faible**

(disposition verticale privilégiée & densité énergétique élevée)

Débit de vapeur restituée : limité par le transfert thermique entre l'eau-vapeur et le MCP



# **3 ■ Optimisation technico-économique et environnementale**

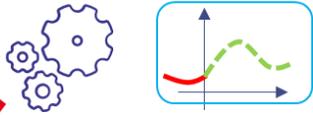
# Optimisation Technico-Economique & Environnementale

MILP problems for joint sizing & control : modelled by PERSEE

What best sizes ?



What control for this system ?



What combination of technologies



PERSEE

KPIs



Assessment scenarios  
'robustness  
flexibility, resilience  
Sensitivity to modelling



- At first to optimize control of DHN simulator by MPC
- Since 2019 to help decision making of CEA and its partners in techno-economic & environmental studies

« How to best integrate new technologies to reduce environmental footprint at affordable costs, at different time horizons »

**PERSEE** designed:

To perform energy mix optimization studies (even by non specialist of optimization)

To capitalize on methods

To perform technology integration studies (MPC - XIL)

To manage tool development cycle

(Ex) Formulation du problème :

Quelle est la taille de stockage et de chaudière bois-énergie qui offre l'optimum économique (meilleur LCOE) pour un objectif environnemental défini ?  
(compte tenu du profil de la demande, des contraintes du moyen(s) de production, du modèle d'investissement, l'actualisation...)

