



# ***Stockage solaire et efficacité énergétique***

**Gilles Fraisse**

Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement  
CNRS-FRE 3220

## ■ L'Institut National de l'Énergie Solaire (INES)



- Bourget du Lac (Savoie)
- Créé en 2006 sur l'initiative de 4 organismes

↳ CEA

↳ CNRS

↳ Université de Savoie

↳ CSTB

Polytech

**LOCIE**

24 enseignants-chercheurs  
37 doctorants / post-doc  
6 IATOS

### □ Objectifs

↳ Développer l'énergie solaire

↳ Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments

### □ Présentation

↳ INES RDI (Recherche Développement et Innovation industrielle)

↳ INES Éducation

### □ 150 personnes sur le site

↳ 450 personnes d'ici 2013

### □ Fin 2010 : nouveau bâtiment

# PLAN DE LA PRESENTATION

## 1 Introduction

- ❑ Contexte et marché solaire

## 2 Les installations solaires et le stockage

- ❑ Généralités sur le stockage de chaleur
- ❑ Systèmes solaires thermiques dans le bâtiment
- ❑ Évaluation des performances

## 3 Stockage solaire et efficacité énergétique

- ❑ Améliorer la stratification
- ❑ Simplifier

## 4 Conclusions

# **1** Introduction

## ■ Contexte environnemental

### □ Un développement **NON** durable

- ↳ Émissions de GES : changements climatiques
- ↳ Épuisement des ressources
- ↳ Pollution : air, eau et sol
- ↳ Destruction de la couche d'ozone

### □ Le Plan climat (2004)

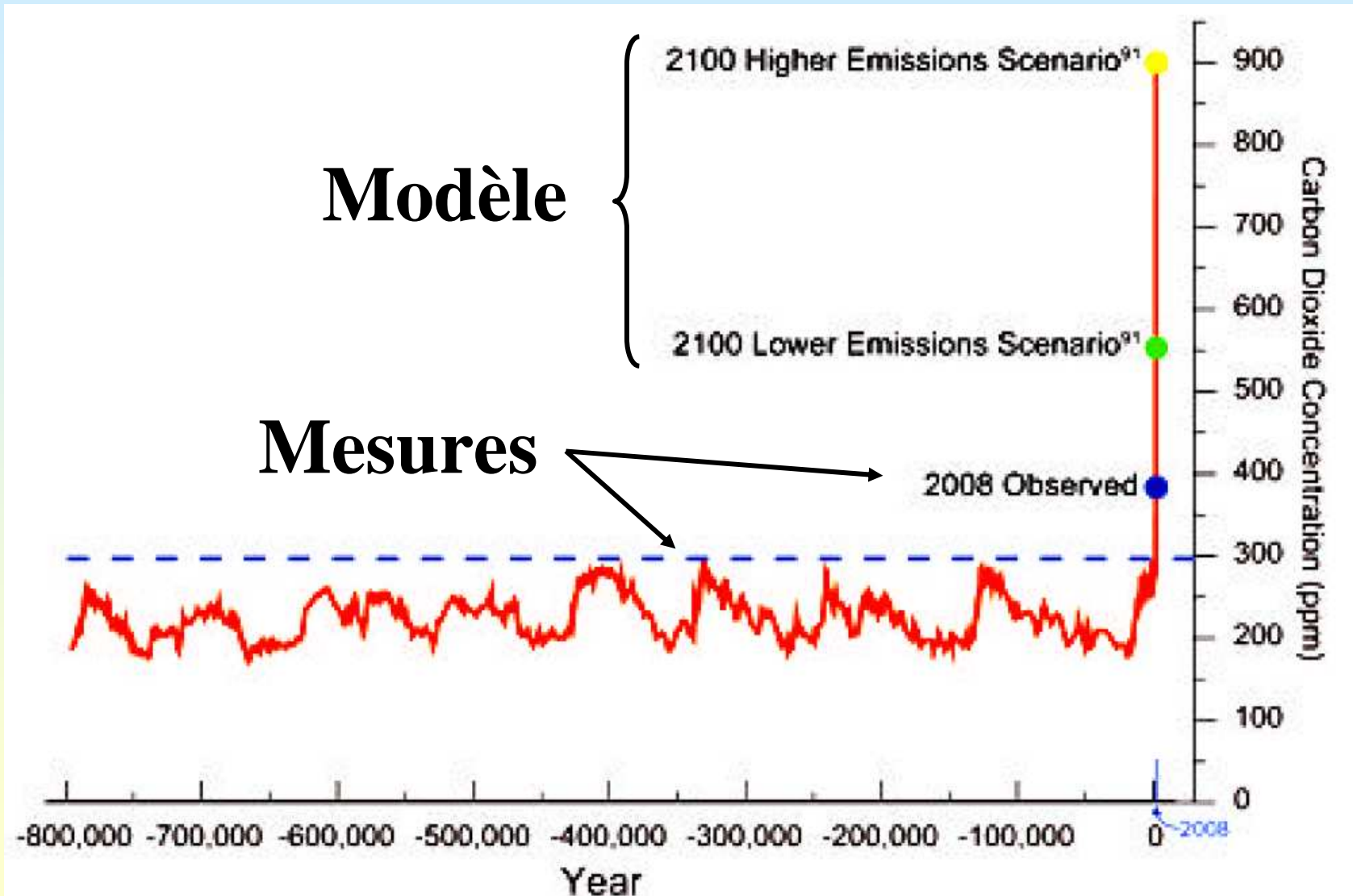
- ↳ Actions : Transport, bâtiment, industrie, déchets ...
- ↳ OBJECTIF : Réduire les émissions de GES d'un « facteur 4 »

### □ Secteur du bâtiment

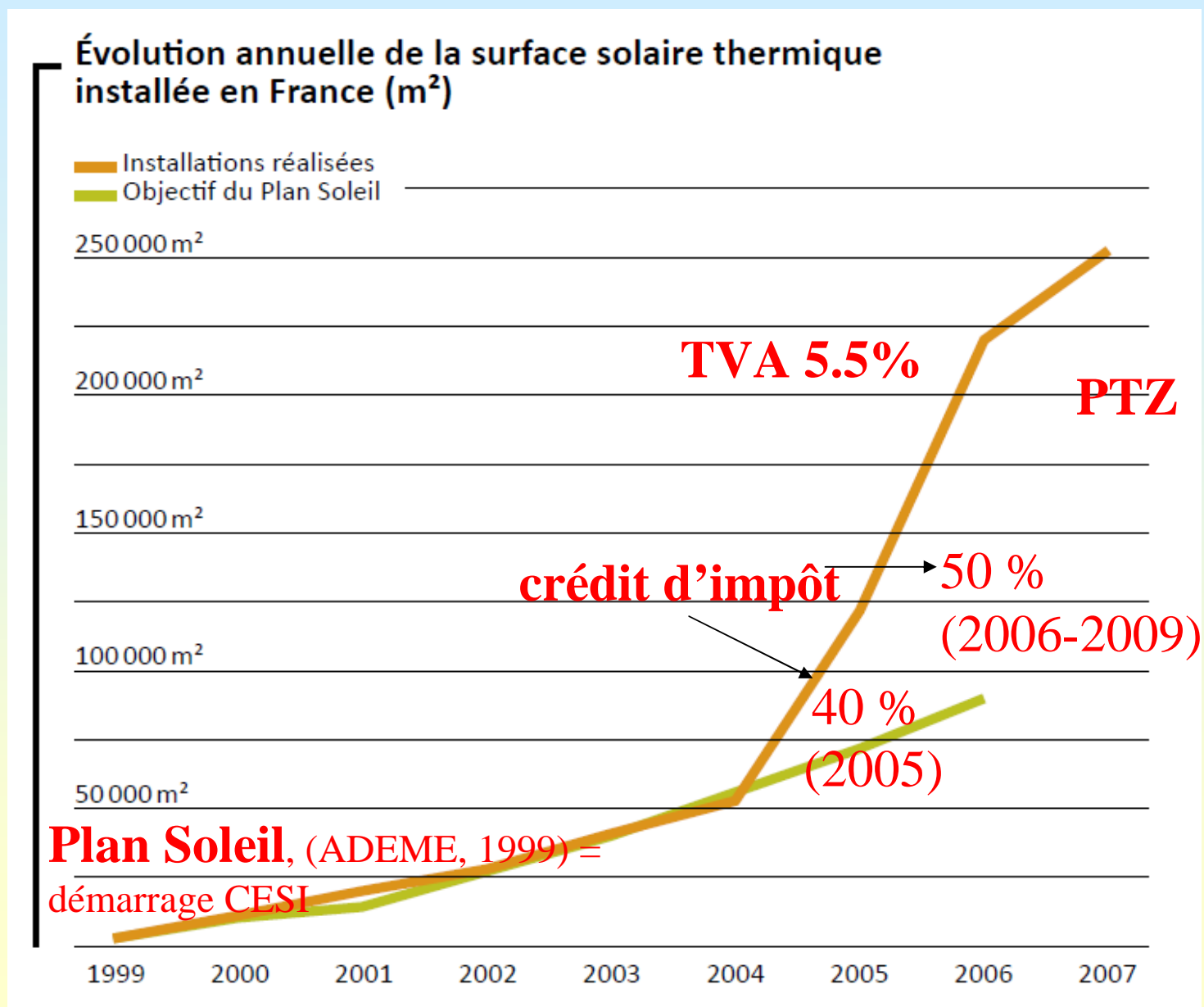
- ↳ 43 % de l'énergie consommée, 23% des émissions de CO<sub>2</sub>
- ↳ Réglementations : RT2005, DPE, BBC (2012) ...

### □ Objectif européen : « Triple 20 » (2007)

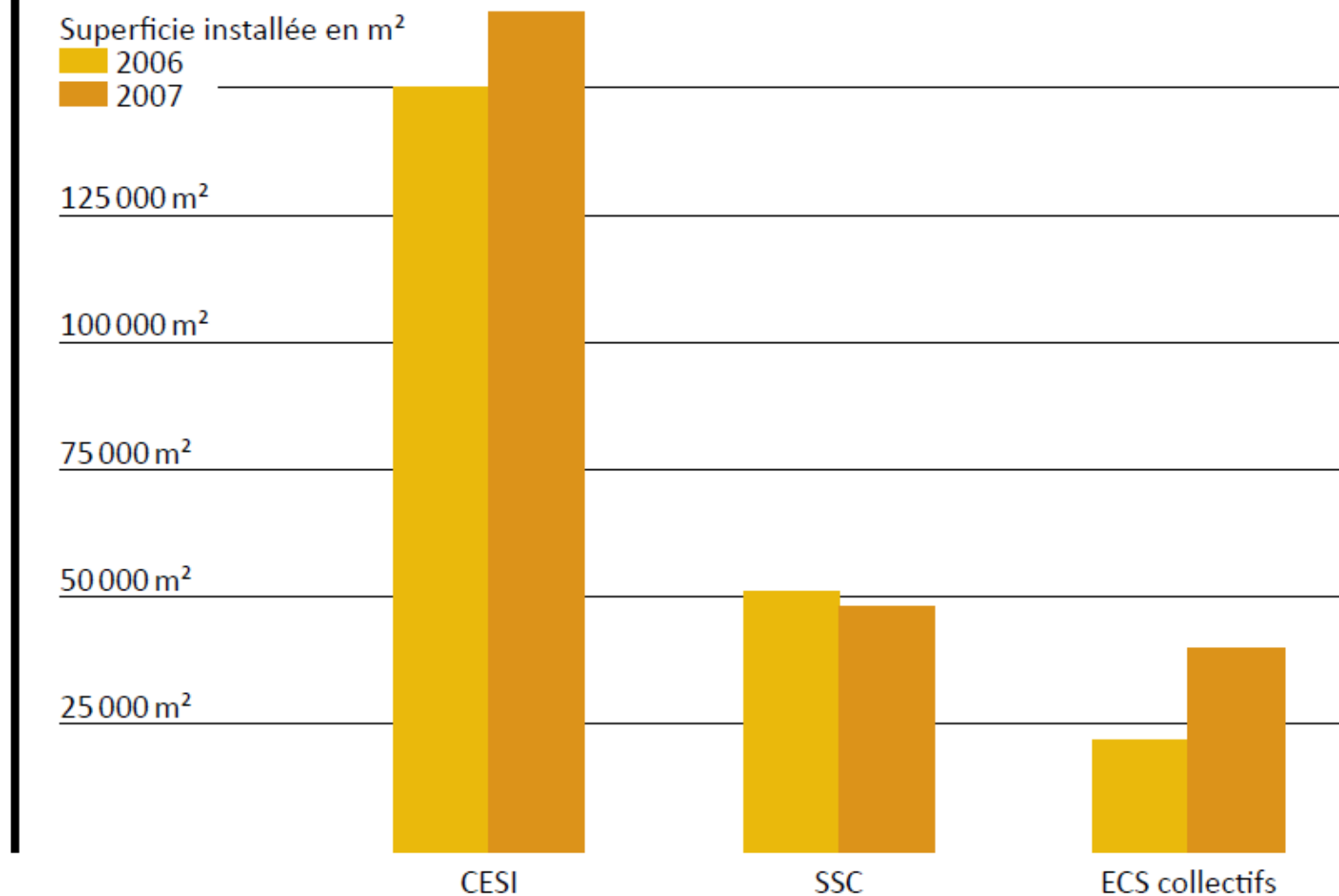
□ Évolution de la concentration du CO<sub>2</sub> sur 800,000 ans



## ■ Un marché solaire en pleine croissance



## Répartition des installations posées par technologie en 2006 et 2007



## **2** Les installations solaires et le stockage

## ■ Chaleurs disponibles

### □ Chaleur sensible

↪ Eau, sol, béton ...

### □ Chaleur latente

↪ Eau, vapeur d'eau, paraffine et sels hydratés...

### □ Chaleur de sorption

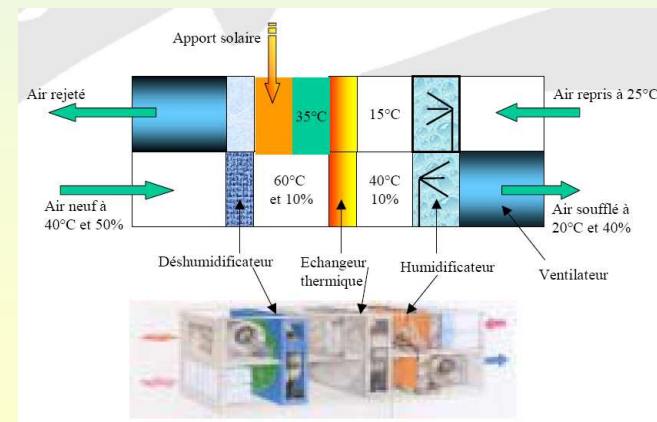
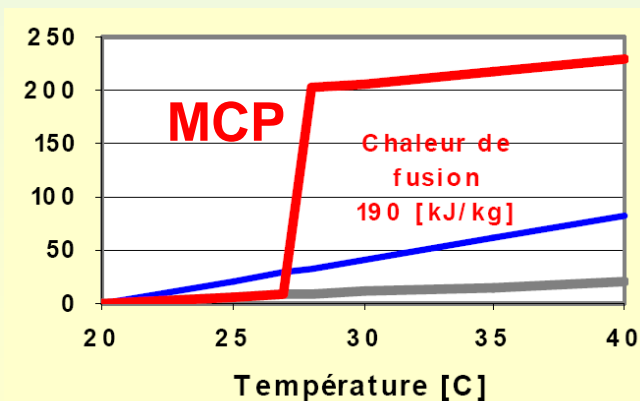
↪ Adsorption dans des solides (zéolithes et gel de silice)

↪ Absorption dans des liquides (LiCl et BrLi)

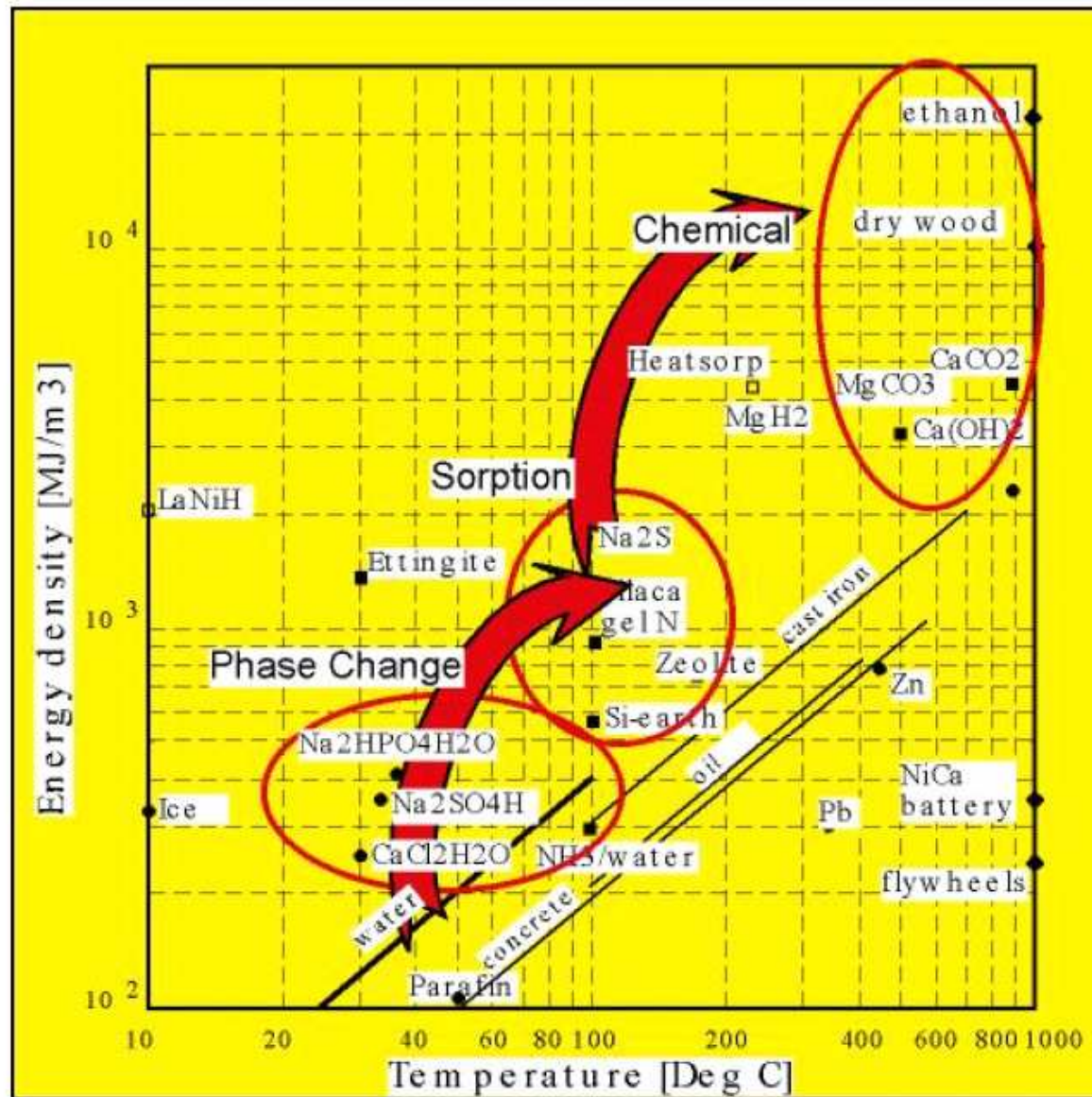
} **exothermique**

### □ Chaleur de réaction chimique

↪ Recombinaison exothermique de 2 liquides ou solides



**Desiccant cooling**



Densité de stockage thermique (Van Berkel 2000 – IEA 32 June 2005)

## ■ Durée de stockage

❑ Très court terme : de l'ordre de la minute ou de l'heure

↳ ballons électriques de 30 l environ, bouilloire



**bouilloire**

❑ Court terme (jour)

↳ BALLON SOLAIRE



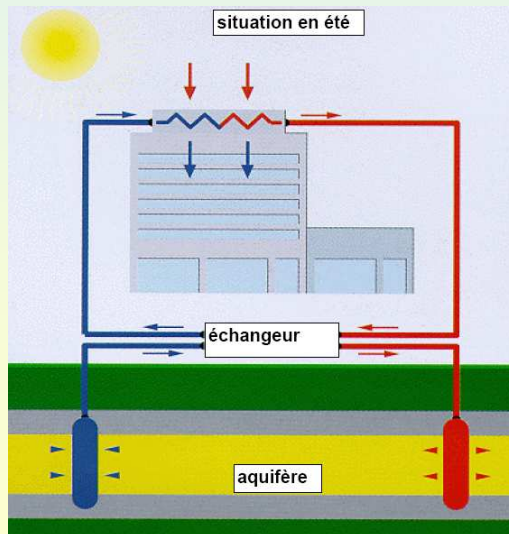
**Ballon solaire**



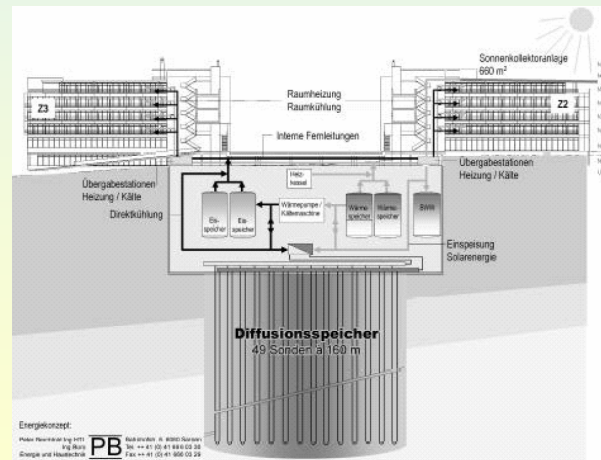
❑ Moyen terme (semaine)

↳ Peu considéré

❑ Long terme ou saisonnier (entre 3 et 6 mois).

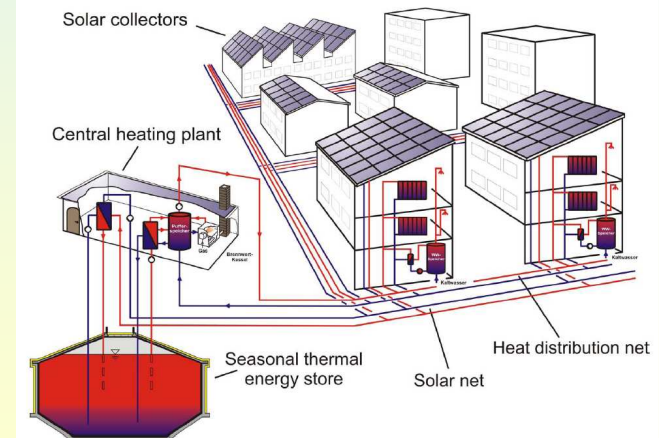


**aquifère**



**sonde**

Central solar heating plant with seasonal storage (CSHPSS)



**cuve**

## ■ Les principales applications

- ❑ Production d'eau chaude sanitaire
- ❑ Chauffage des bâtiments
- ❑ Piscine

### STOCKAGE

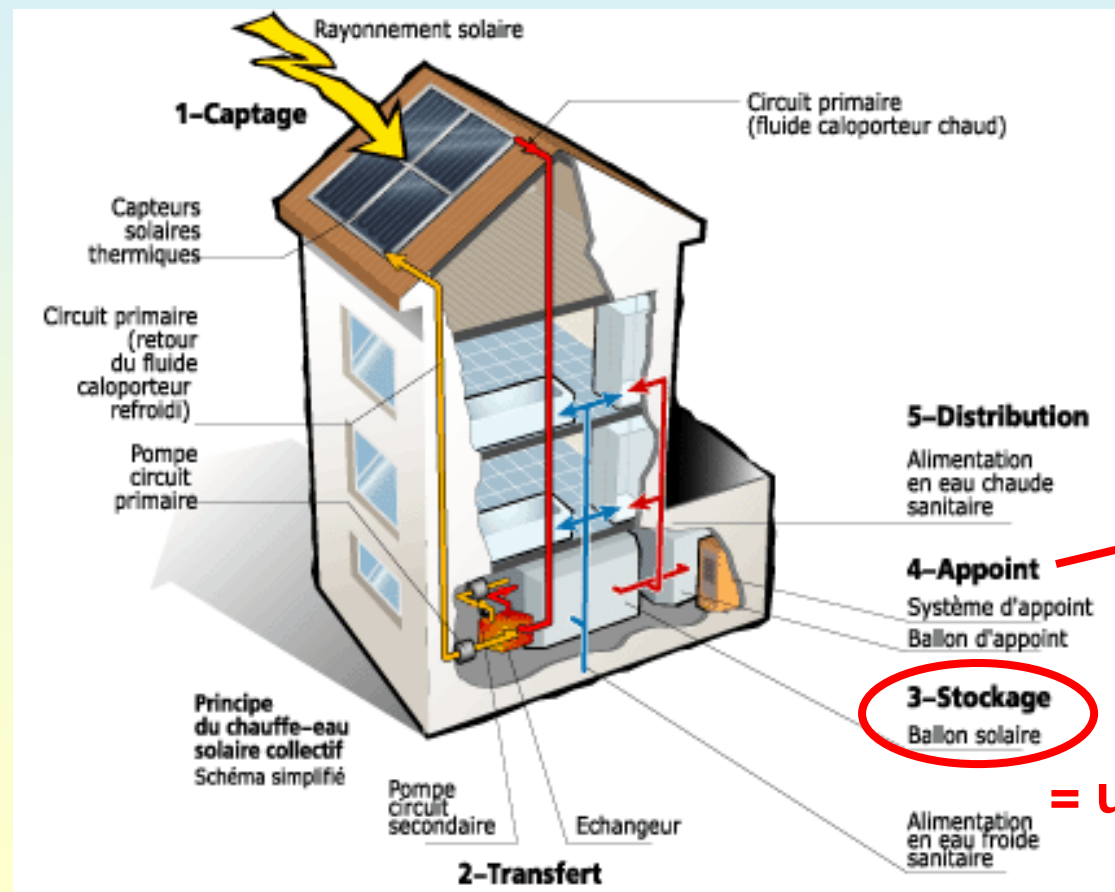
$$V \approx V_{\text{soutirage}}$$

### CAPTEUR

$$S_{\text{m}^2} \approx V_{\text{litres}} / 75$$

Plein sud - 45°

↻ environ ↻

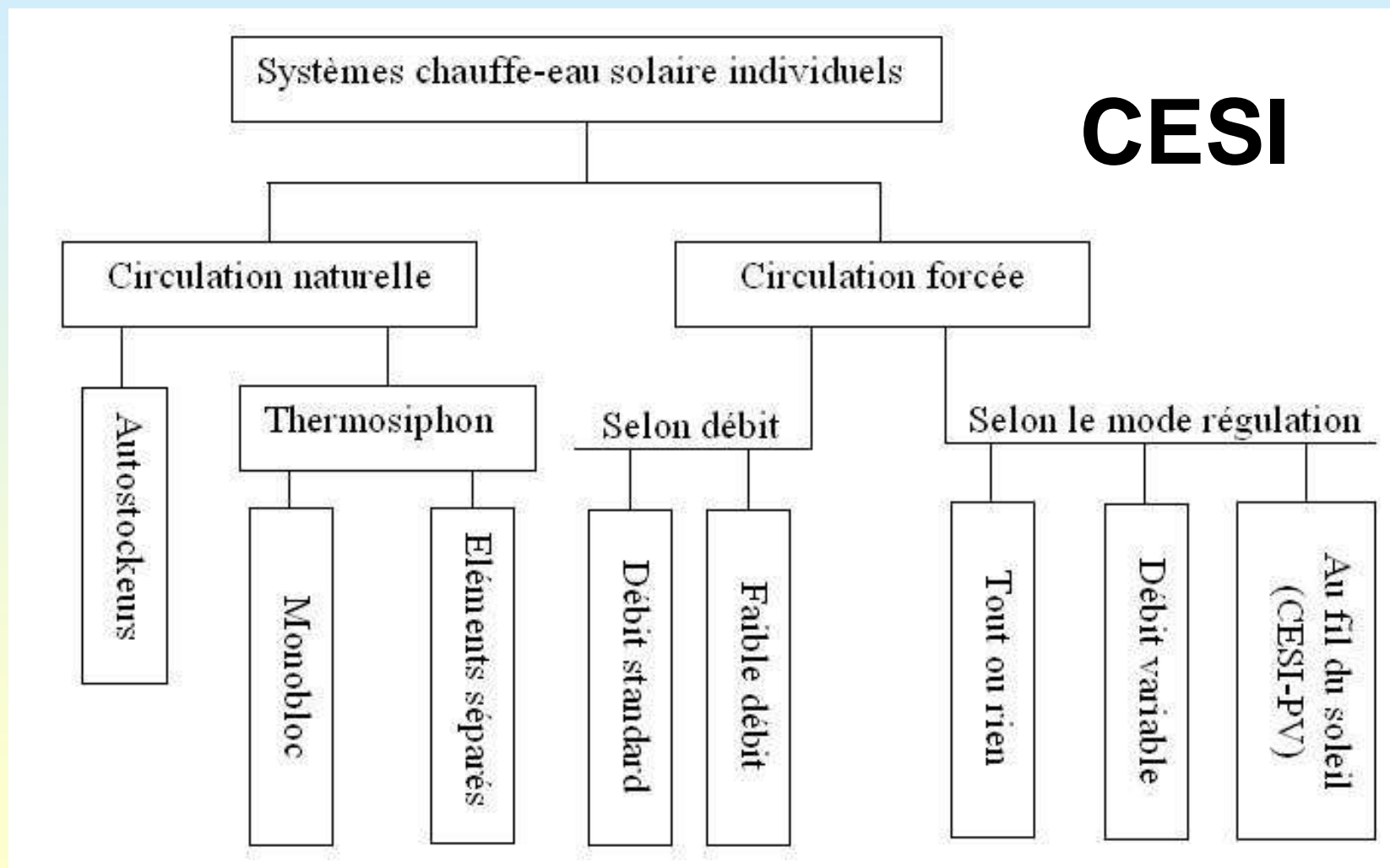


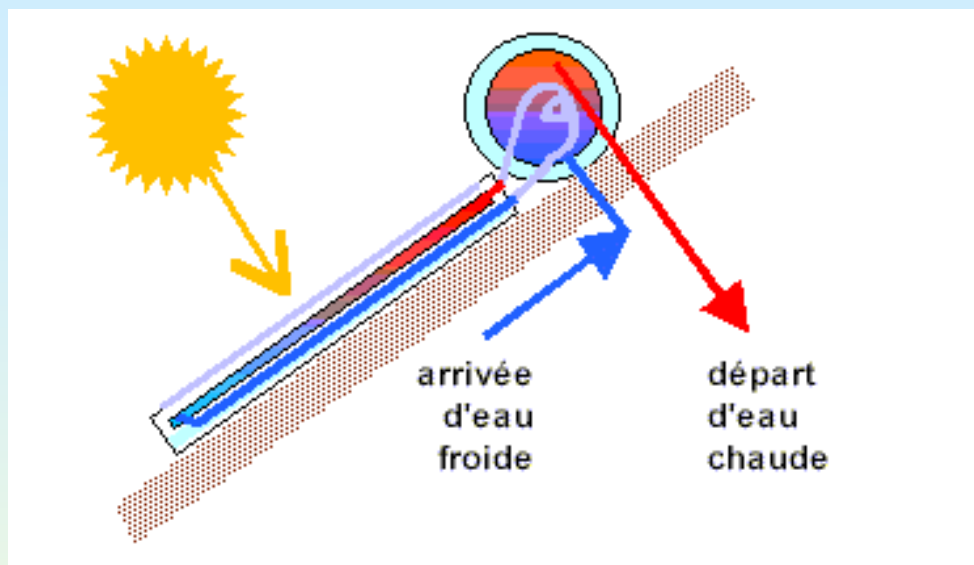
= un composant

## ■ Chauffe-eau solaire individuel

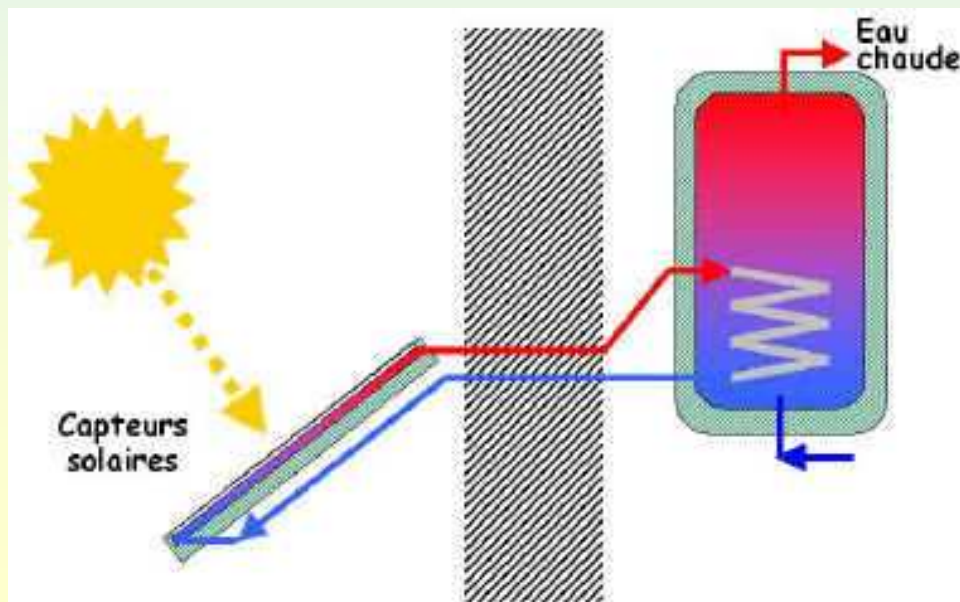
35-50 l/(pers.jour)

6-10 cm d'isolant





**CESI thermosiphon monobloc**



**CESI thermosiphon à éléments séparés**

## ❑ Avantage

↳ Simple

↳ Faible coût

## ❑ Inconvénients

↳ Pertes thermiques du stockage

↳ Esthétique

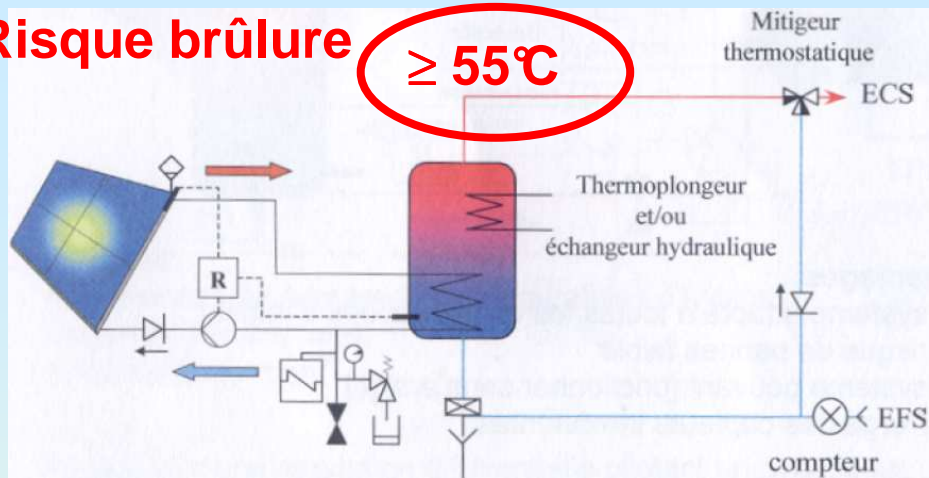
↳ Climats chauds uniquement (gel)



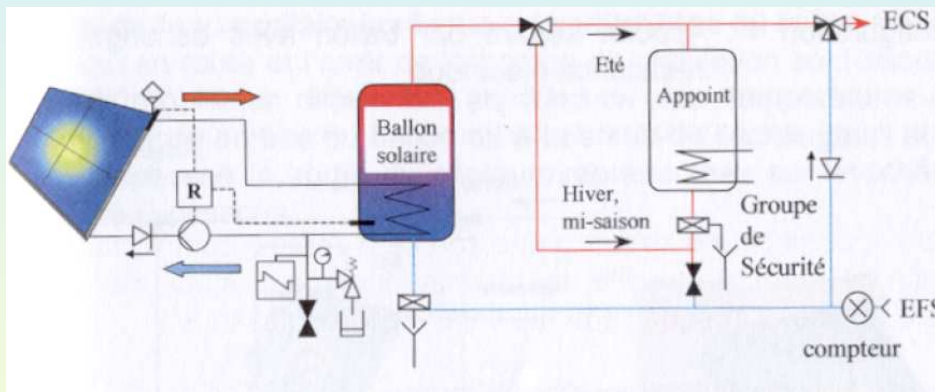
Risque brûlure

$\geq 55^\circ\text{C}$

55°C



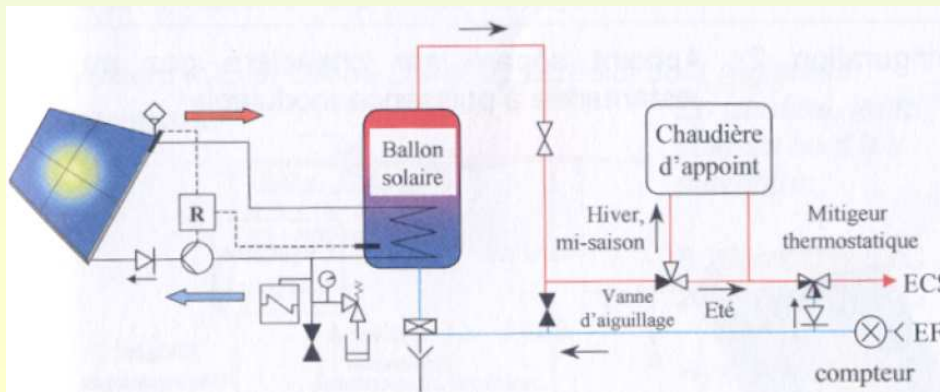
ballon  
bi-énergie



2 ballons  
en série

**CESI**  
**à éléments séparés**

45 à 70 % des besoins  
450-550 kWh/m<sup>2</sup>



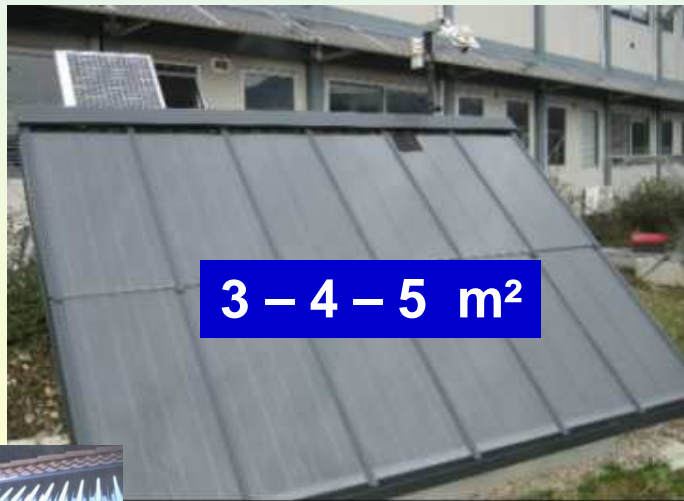
appoint instantané

## □ Avantage

- ↳ Métropole (gel)
- ↳ Performance
- ↳ Esthétique

## □ Inconvénients

- ↳ Plus complexe
- ↳ Suivi des performances
  - Dysfonctionnements possibles : sondes, régulation ...



3 - 4 - 5 m<sup>2</sup>



300-400 l



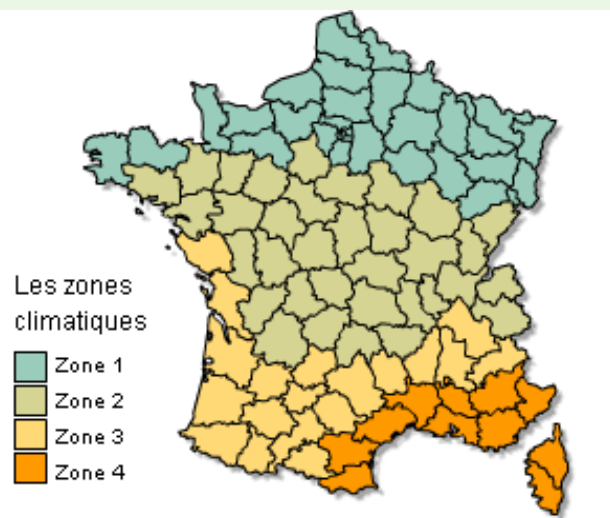
appoint

solaire

Nombre d'occupants	1 ou 2	3 ou 4	5 ou 6	7 ou 8
Volume du ballon solaire <sup>1</sup> (en litres)	100 à 150	100 à 250	250 à 350	350 à 500
Volume total du ballon <sup>2</sup> (en litres)	100 à 250	250 à 400	400 à 550	550 à 650
Zones climatiques	Surface des capteurs (en m <sup>2</sup> )			
Zone 1	2 à 3	3 à 5,5	4 à 7	5 à 7
Zone 2	2 à 3	2,5 à 4,5	3,5 à 6,5	4,5 à 7
Zone 3	2 à 2,5	2 à 4	3 à 5,5	3,5 à 7
Zone 4	2 à 2,5	2 à 3,5	2,5 à 4,5	3,5 à 6

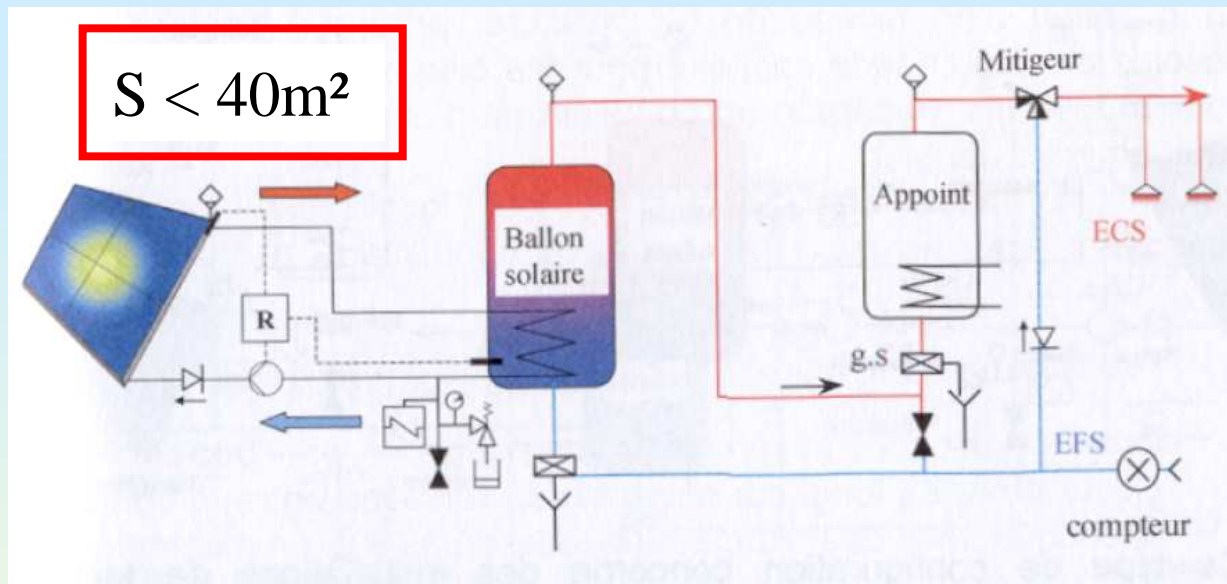
1 : pour un chauffe-eau solaire sans appoint ;

2 : pour un chauffe-eau solaire avec appoint.

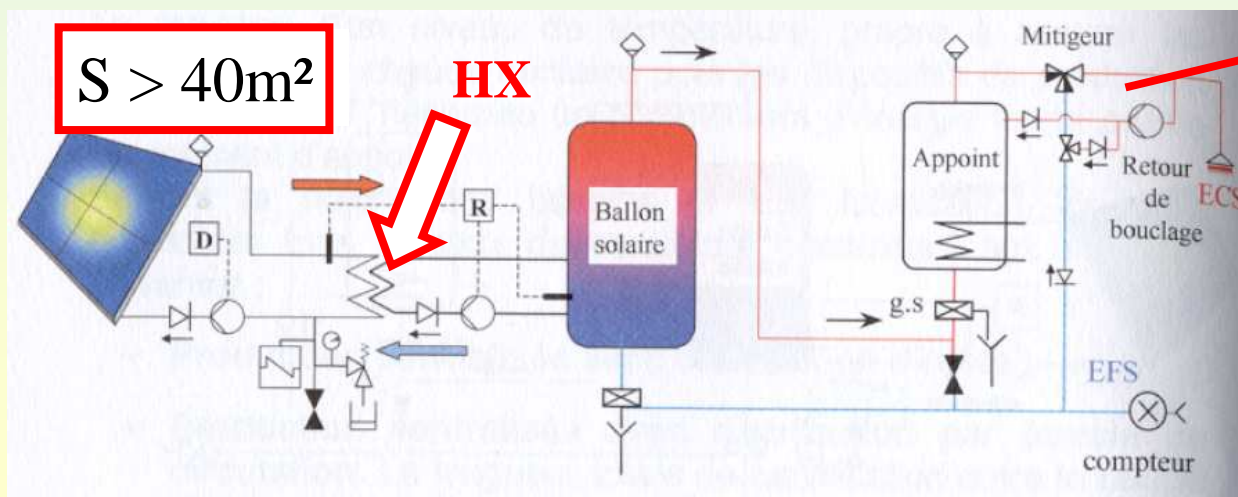


## Dimensionnement type (CESI)

## ■ Eau chaude solaire collective



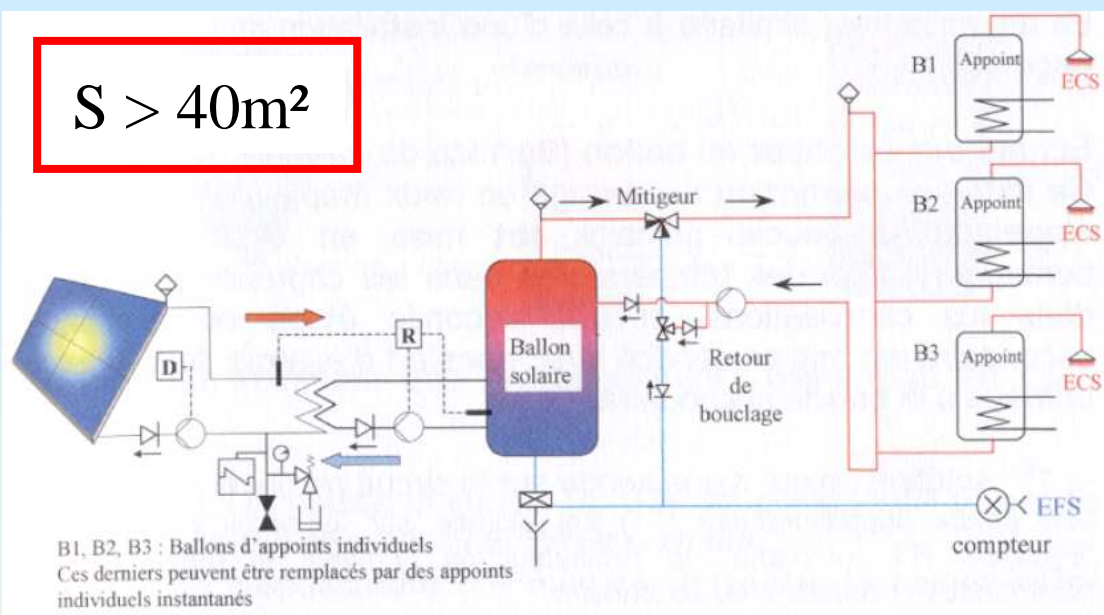
Production centralisée  
et distribution directe



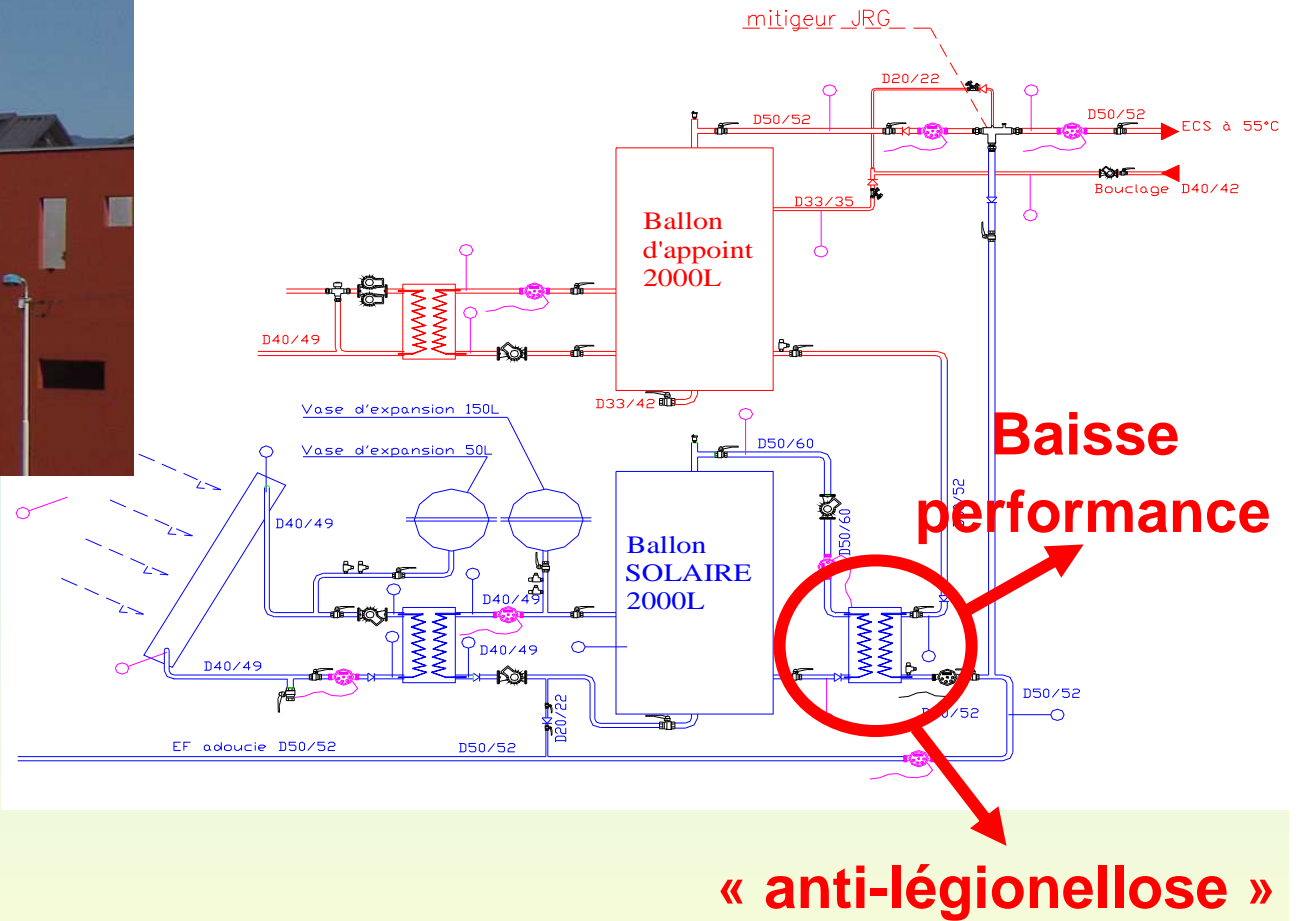
**⚠ Pertes thermiques**

Production centralisée  
et distribution par  
boucle de circulation

$S > 40m^2$



Appoint décentralisé  
avec distribution par boucle



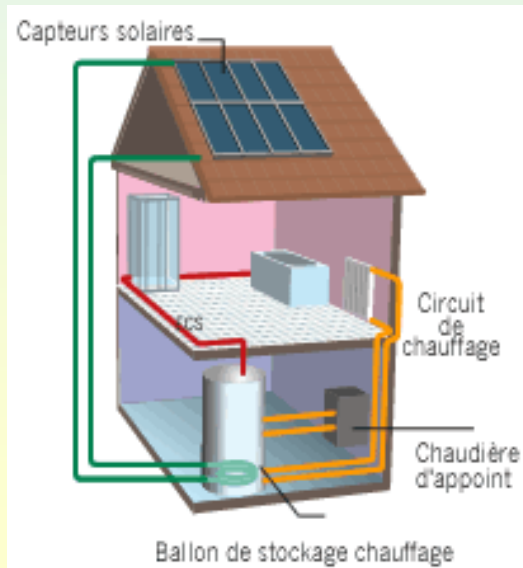
- ❑ Attention à la consommation de la boucle de circulation
- ❑ Garantie de résultats solaire (SOLO)
  - ↳ Maître d'ouvrage
  - ↳ Installateur / bureau d'études

## ■ Systeme Solaire Combine (SSC)



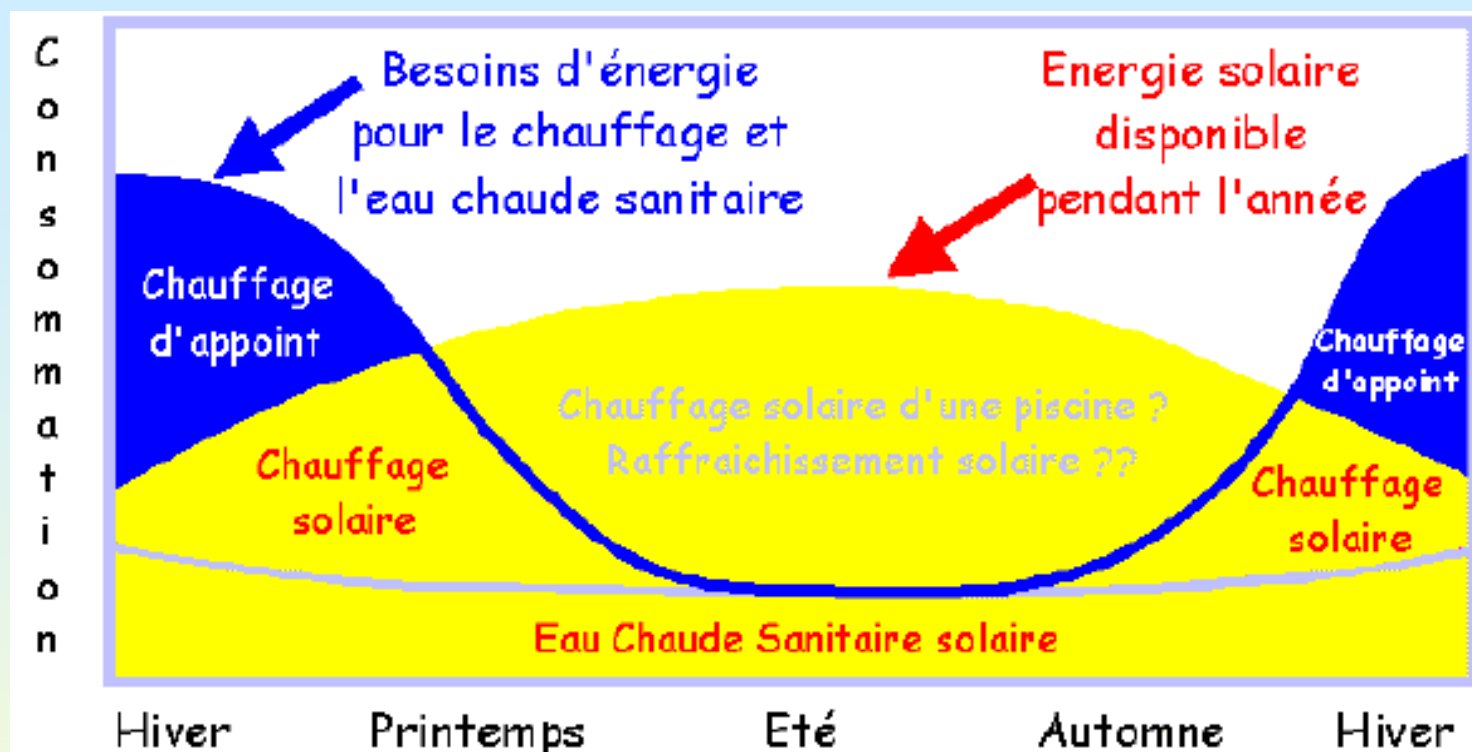
### Plancher Solaire Direct (PSD)

- ↪ Stockage dans la dalle
- ↪ Plancher : 10-15 cm
- ↪ bon rendement des capteurs



### Hydro-accumulation

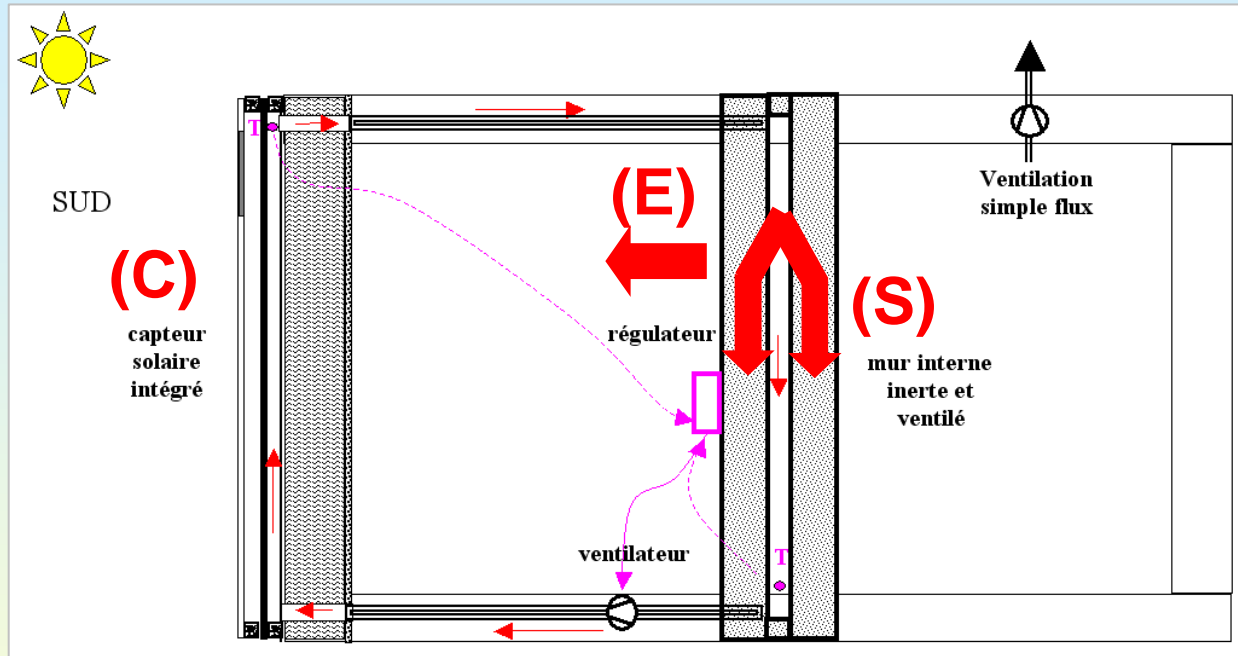
- ↪ émetteur basse température



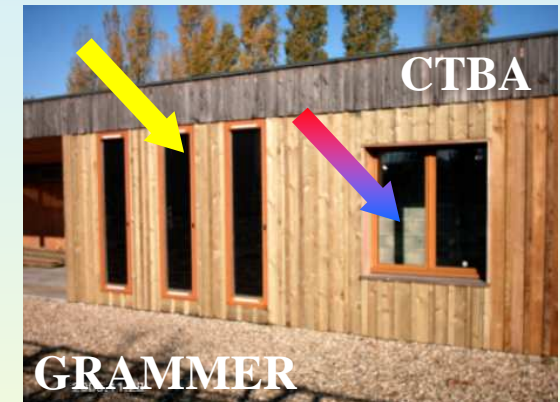
**Attention aux sur-chauffes en été**

décharge : sol, refroidissement nocturne, circuit sous haute pression

## ■ Capteur solaire à air / mur ventilé



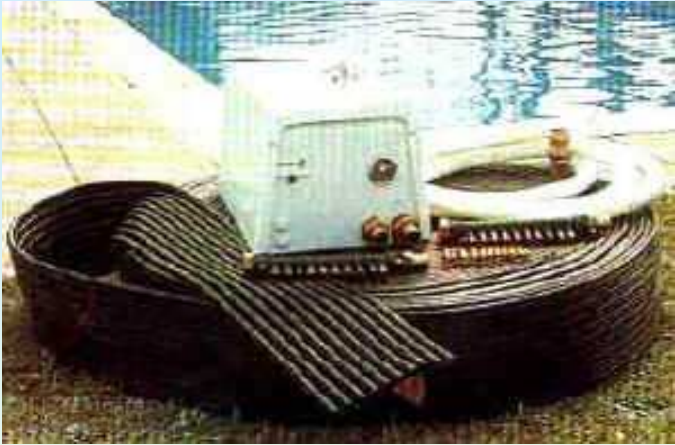
Cellule  
expérimentale



### Composants d'enveloppe actifs

- Capteur air intégré = production
- Mur ventilé à inertie = stockage + émission

## ■ Piscine



individuel

kit Giordano

Text = 15 °C      +10°C



collectif

avec chauffage : mai à septembre

sans chauffage :  $\forall$  semaines

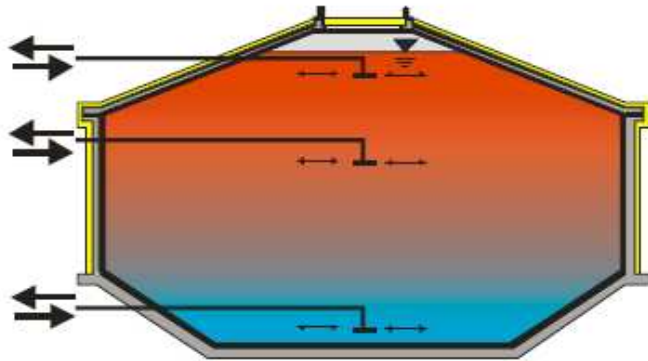
## ■ Stockage inter-saisonnier



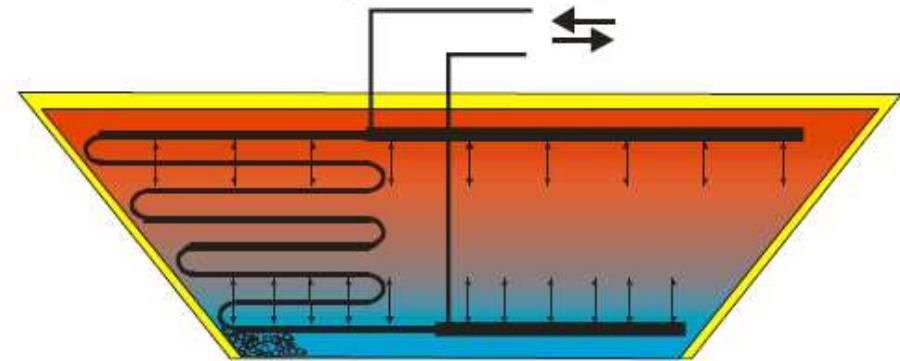


# Seasonal thermal energy stores in Germany

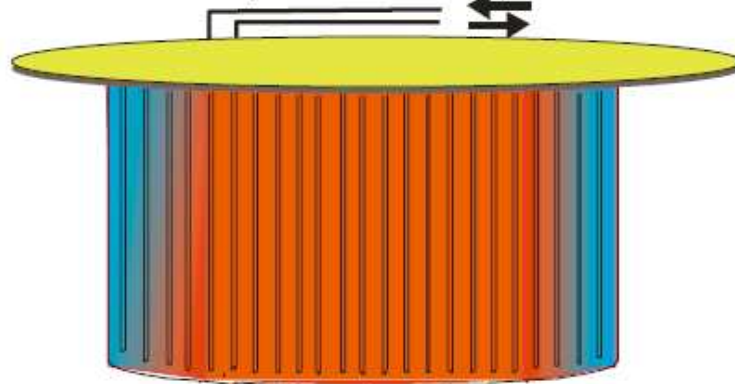
hot-water thermal energy store  
(60 - 80 kWh/m<sup>3</sup>)



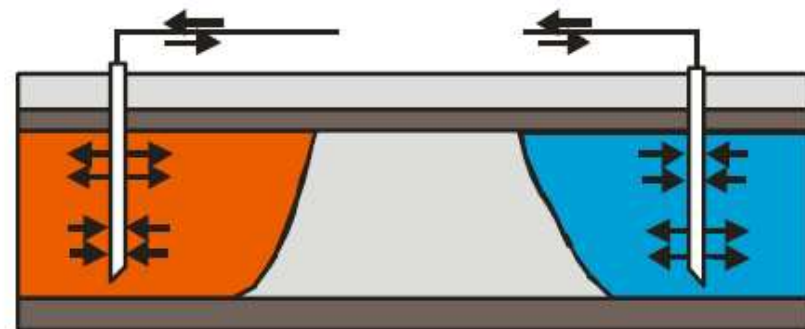
gravel/water thermal energy store  
(40 - 50 kWh/m<sup>3</sup>)

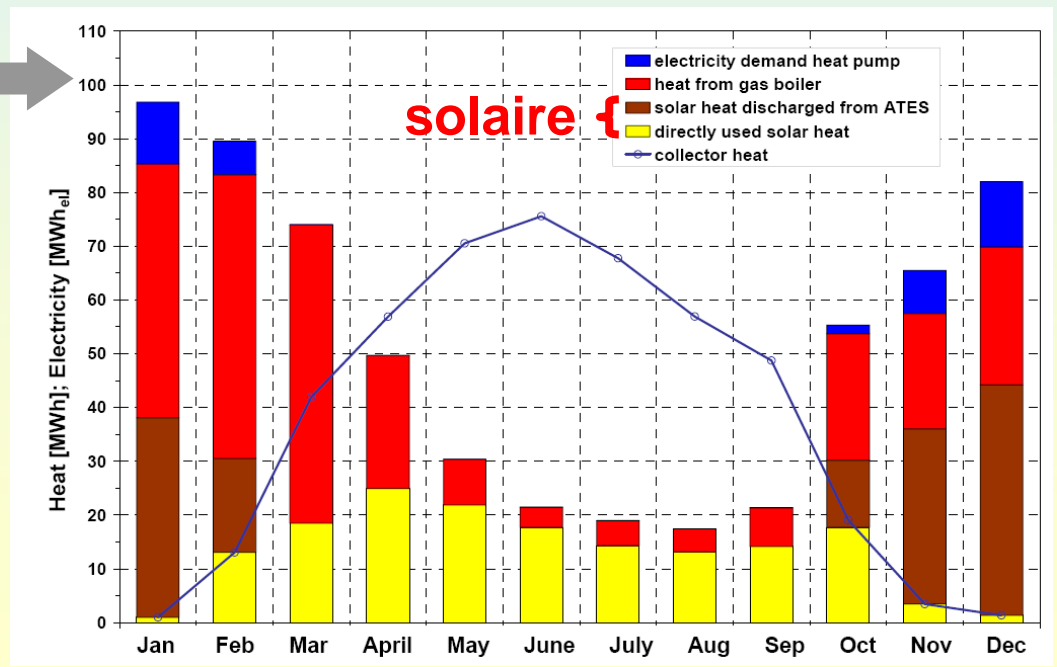
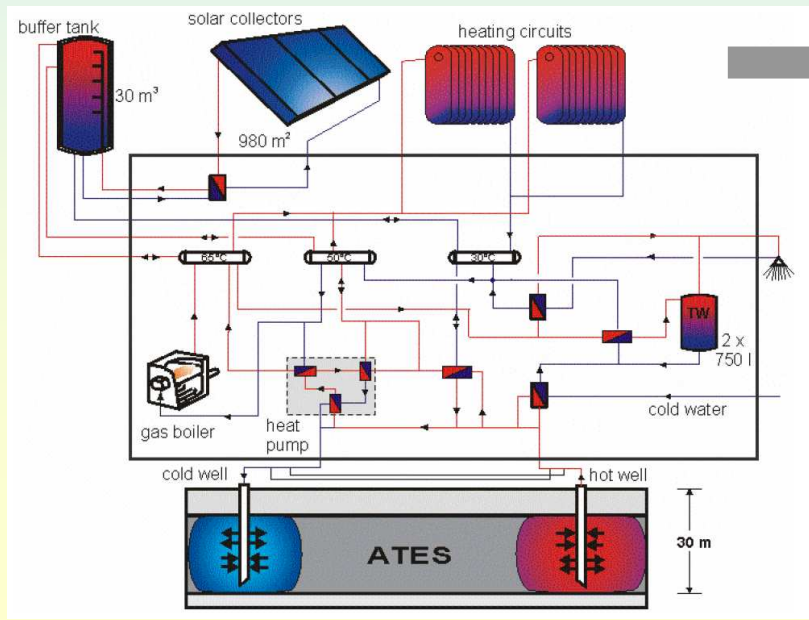
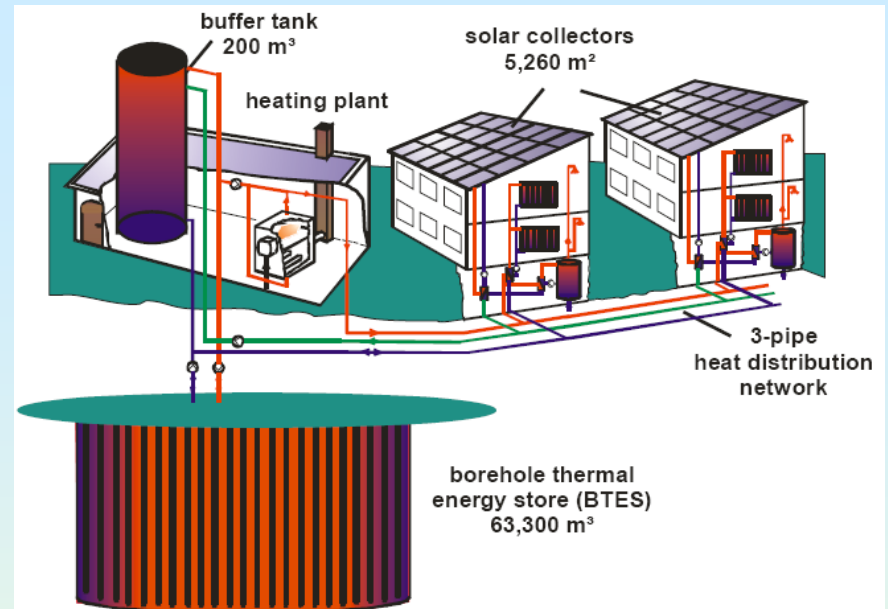
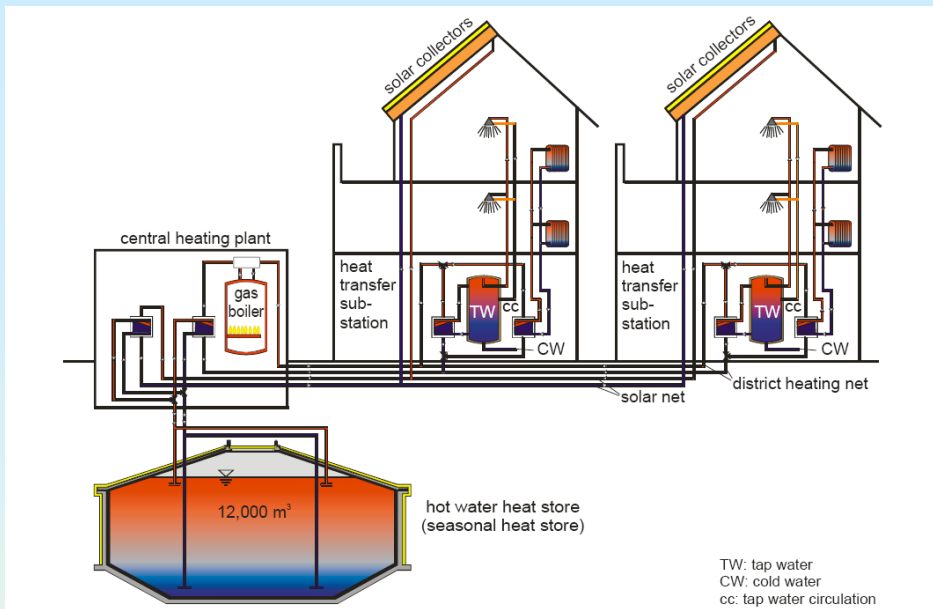


borehole thermal energy store  
(15 - 20 kWh/m<sup>3</sup>)



aquifer thermal energy store  
(30 - 40 kWh/m<sup>3</sup>)

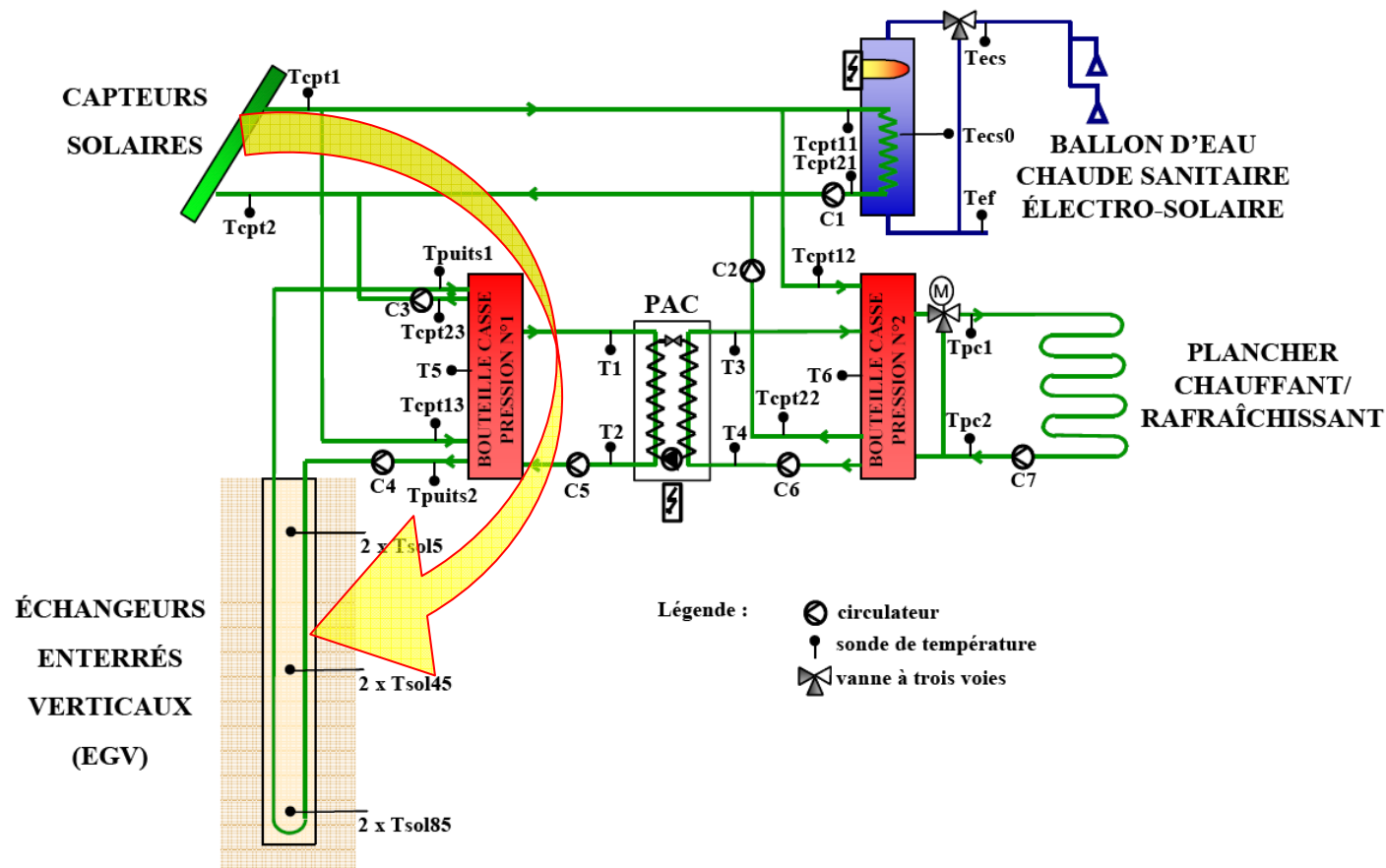




## ■ Recharge du sol

### Injection d'énergie solaire dans le sol

systemes solaires combinés avec des pompes à chaleur géothermiques à échangeurs enterrés verticaux :



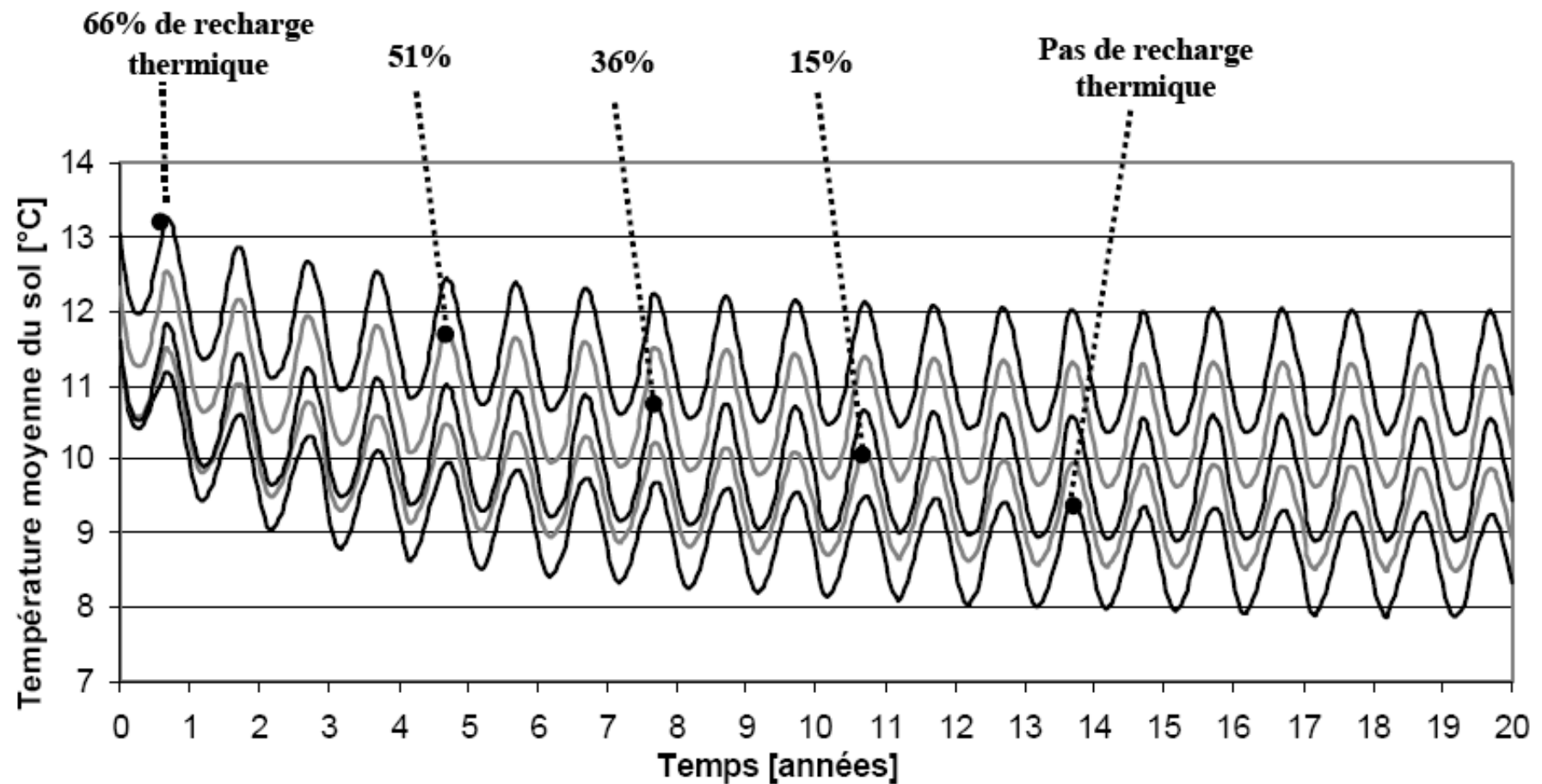
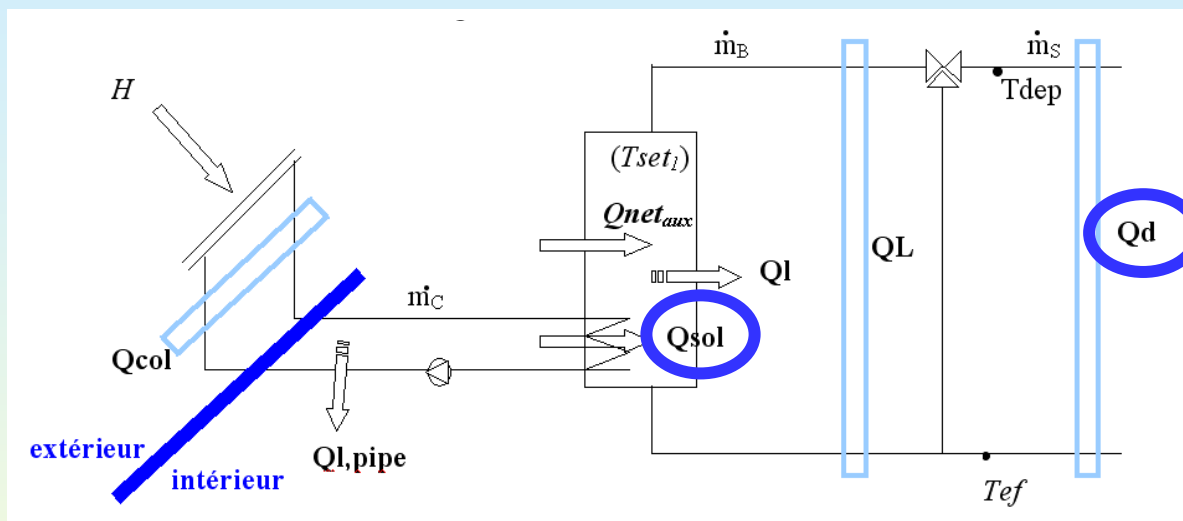


Figure 5 : Evolution de la température du sol en fonction des taux de recharges thermiques du sol (procédé couplé à une maison individuelle)

## ■ Efficacité énergétique



$$CS = E_{\text{solaire}} / E_{\text{fourni}}$$

$$\text{Prod.} = E_{\text{solaire}} / S_{\text{capteur}}$$

**appoint ?**

Productivité en sortie de capteur	$Prod = Q_{col} / S_c$	[kWh/m <sup>2</sup> ]
Rendement en sortie de capteur	$\eta_{cap} = Q_{col} / (H \cdot S_c)$	[-]
Taux de couverture solaire	$F_{sol} = Q_{sol} / Q_d$	[-]
Variante du taux de couverture solaire <sup>28</sup>	$F_{sol}' = Q_{sol} / (Q_{sol} + Q_{net,aux})$	[-]
Coefficient de performance moyen	$COP = Q_d / Q_{f,aux}$	[-]
Economie sur l'énergie finale	$Q_{f-sav} = (Q_{f,conv} + Q_{f,sup-conv}) - (Q_{f,aux} + Q_{f,sup-aux} + Q_{par})$	[kWh]
Economie sur l'énergie primaire <sup>29</sup>	$Q_{p-sav} = (Q_{p,conv} + Q_{p,sup-conv}) - (Q_{p,aux} + Q_{p,sup-aux} + 2.58 Q_{par})$	[kWh]
Taux d'économie en énergie finale	$F_{sav-f} = Q_{f-sav} / (Q_{f,conv} + Q_{f,sup-conv})$	[-]
Taux d'économie en énergie primaire	$F_{sav-p} = Q_{p-sav} / (Q_{p,conv} + Q_{p,sup-conv})$	[-]

Solaire

→ Solaire + Besoins

→ Solaire + Appoint

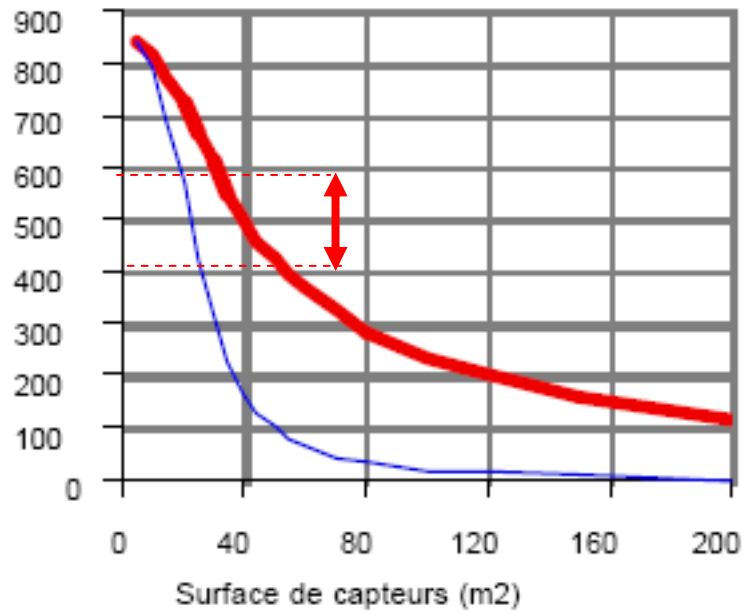
→ Besoins + Appoint

Conventionnel

+ Appoint

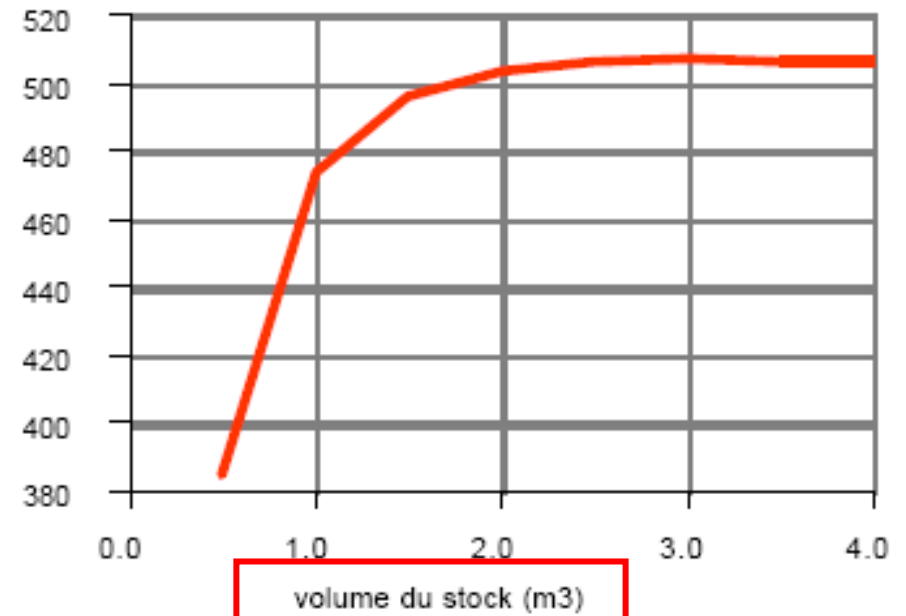
+ Parasite

conso : 2m<sup>3</sup>/jour, stock : 2m<sup>3</sup>



Productivité Pr marginale

conso : 2m<sup>3</sup>/jour, capteurs : 40m<sup>2</sup>



Productivité (kWh/m<sup>2</sup>/an)

**Ne pas sur-dimensionner** (coût, rendement)

	Irradiation capteurs (Wh/m2.jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Taux (%)	Volume (litres)
janvier	1659	388	94	24.2	200
fevrier	2695	344	128	37.2	200
mars	3932	365	199	54.5	200
avril	4715	343	228	66.5	200
mai	5383	341	258	75.6	200
juin	5535	318	252	79.3	200
juillet	5830	321	264	82.2	200
aout	5549	323	255	79.1	200
septembre	4661	322	220	68.2	200
octobre	3229	352	169	47.9	200
novembre	1825	358	101	28.3	200
decembre	1358	385	80	20.9	200
Taux couverture solaire	54.0 %	Apport solaire annuel	2249 kWh/an		
Besoin annuel	4161 kWh/an	Productivite annuelle	450 kWh/m2.an		

calcul realise sur [www.tecsol.fr](http://www.tecsol.fr)

## Méthode SOLO (ECS collectif)

50 à 60 %

450 – 550 kWh/m<sup>2</sup>

### ■ Coût global actualisé

$$N = \frac{\ln \left( 1 + \frac{SI}{Eco} \cdot \frac{r-1}{r} \right)}{\ln(r)} \quad \text{(temps de retour)}$$

### ■ Gaz à effet de serre

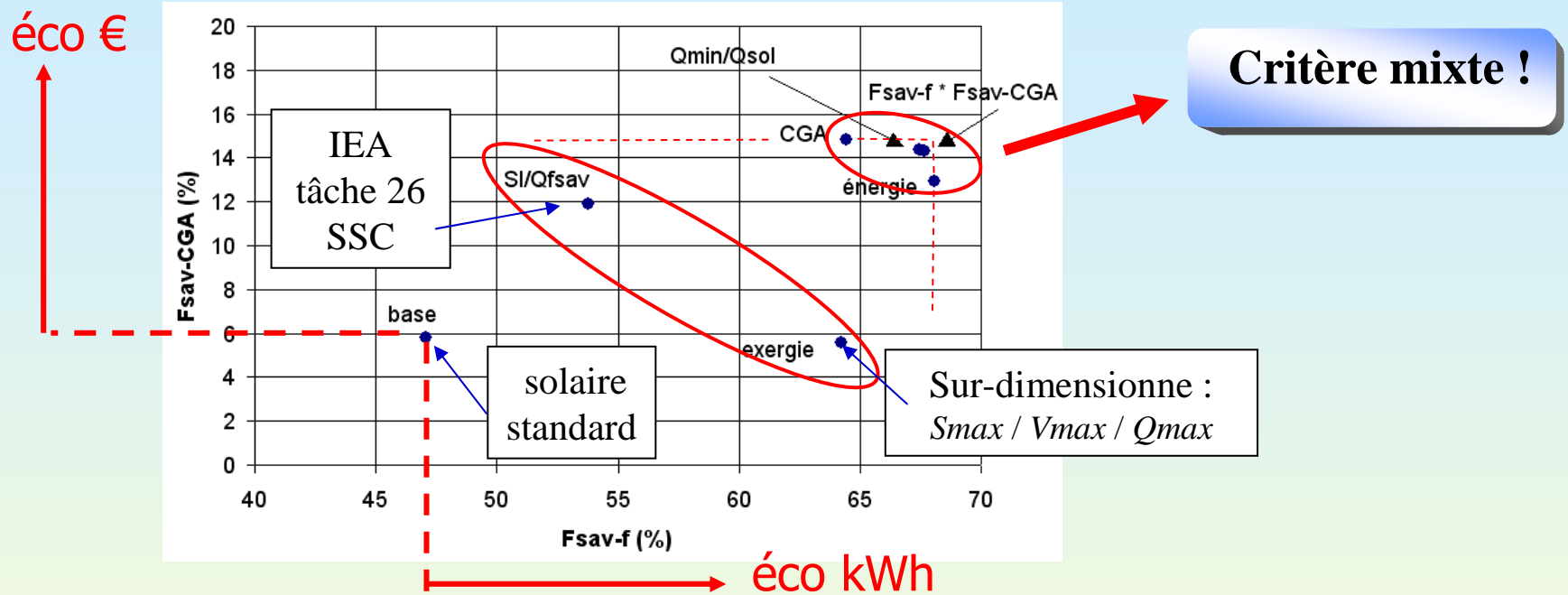
CO2 non émis / installation conventionnelle

## ■ Conception / dimensionnement

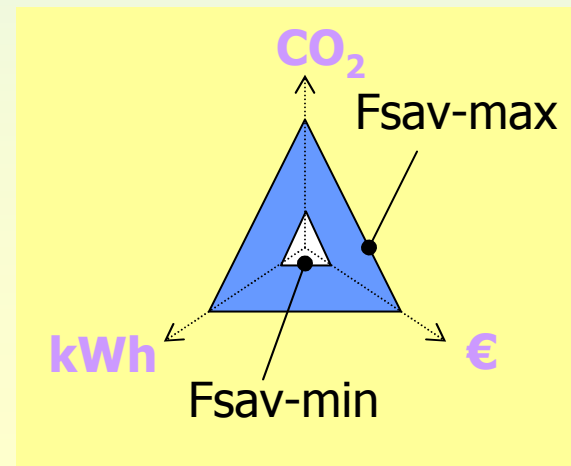
- ❑ Ne pas sur-dimensionner ... estimer **précisément** les consommations
- ❑ Productivité et couverture solaire
- ❑ Suivi in-situ (GRS)
- ❑ Fonctionnement basse température = réduction des pertes
- ❑ Attention aux risques sanitaires : légionellose

- au moins 60°C (légionelles éliminées en 25 min)
- éliminer les zones tièdes dans les ballons de **stockage**
- lutter contre l'entartrage et la corrosion
- éviter la stagnation (bras morts des réseaux)

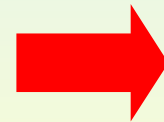
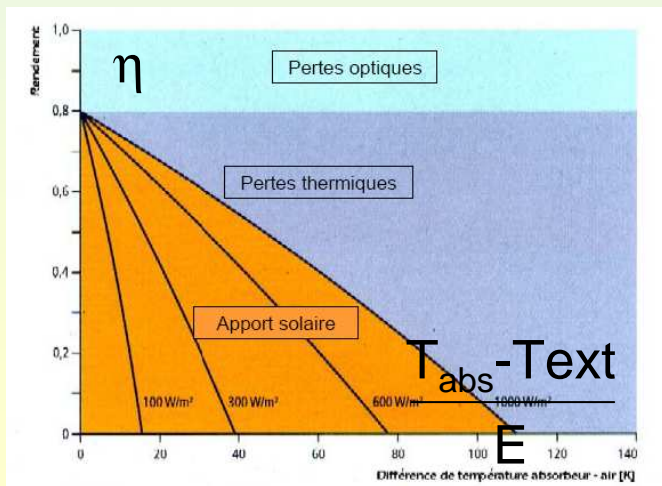
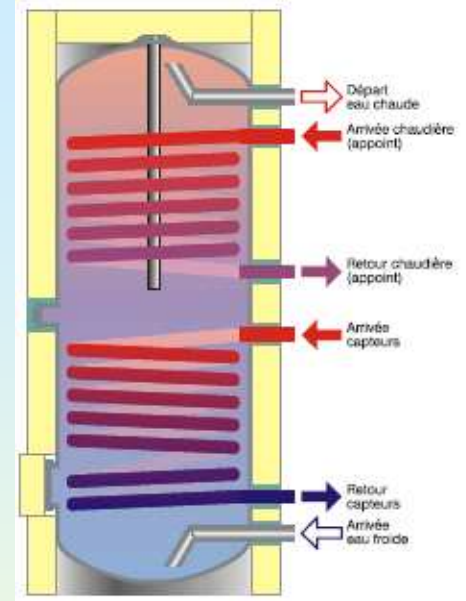
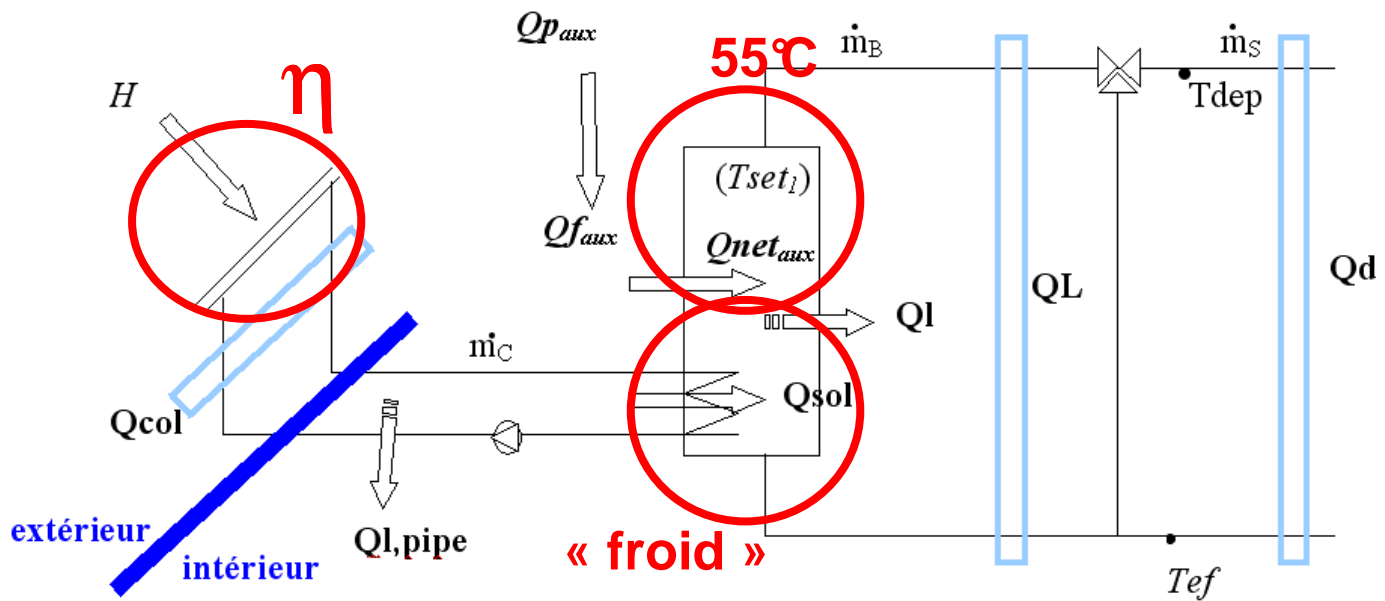
# ■ Quel critère d'optimisation ?



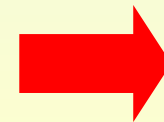
**REPRESENTATION RADAR :**  
3 critères



### **3** Stockage solaire et Efficacité énergétique



**STRATIFICATION**  
stockage

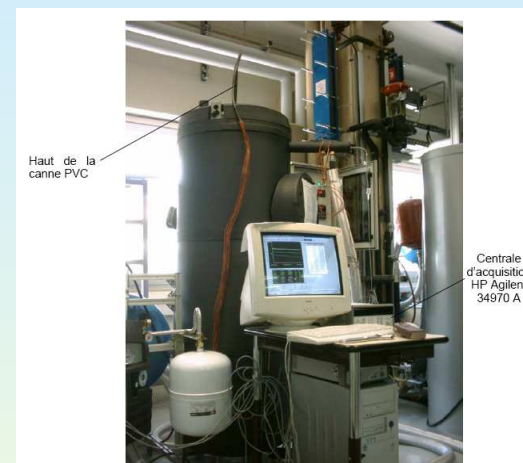
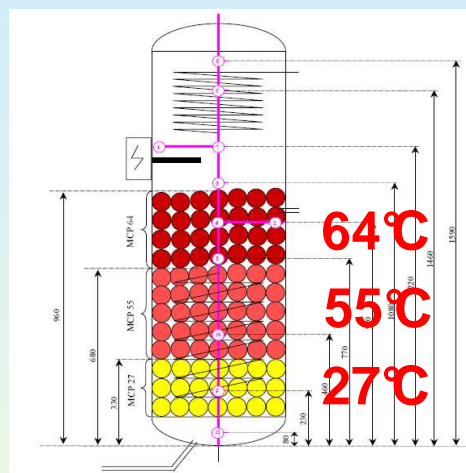


**THERMOSIPHON**

+ : auxiliaire / simplification

⚠ gel / pertes / esthétique

## ■ Matériaux à changement de phase



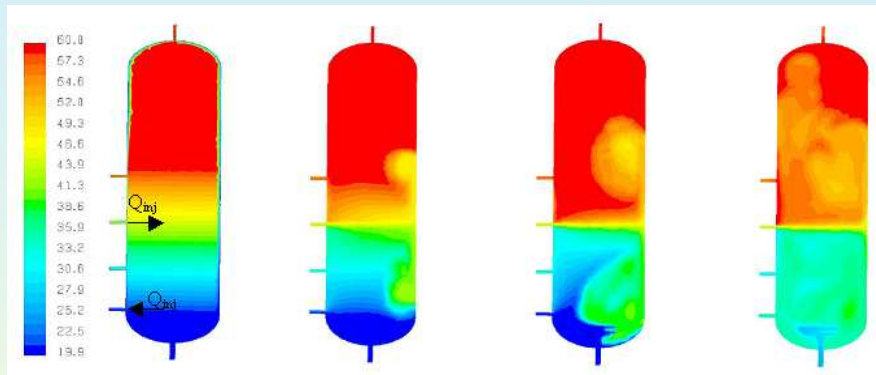
- ❑ Favoriser la stratification ( $T_{\text{fusion}}$  des nodules)
- ❑ Limiter les déperditions du stockage ( $T_{\text{max}}$  du stockage)
- ❑ Accroître la capacité de stockage

Thèse : C. Plantier (LOCIE, CSTB)

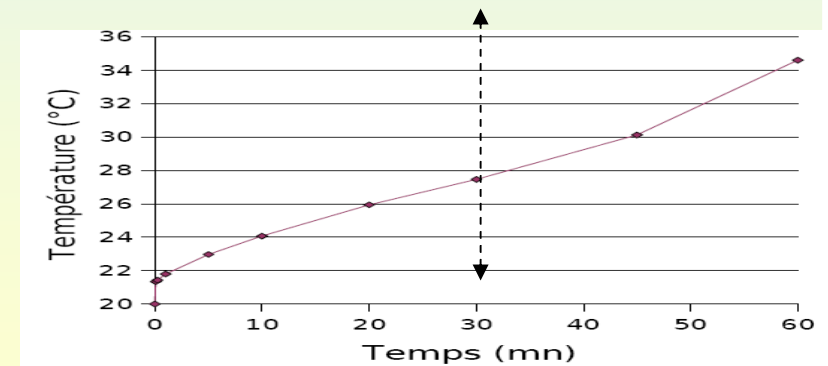
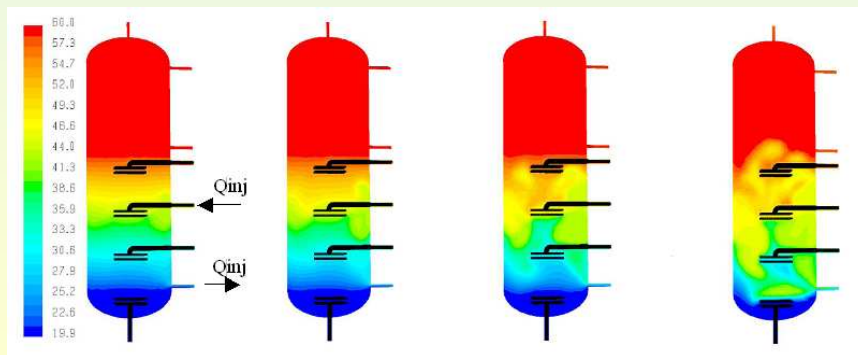
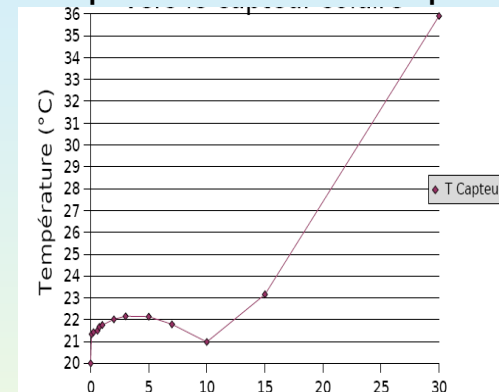
MCP = sels hydratés (Cristopia Energy Systems)

## ■ Dispositifs spécifiques d'injection

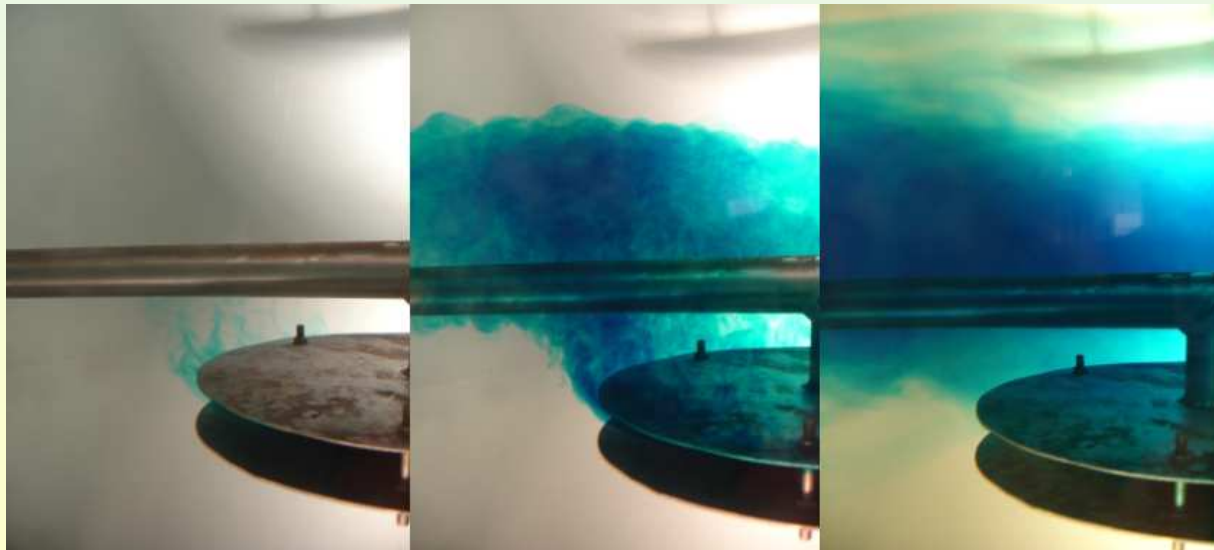
- ❑ Réduire la vitesse d'injection (injecteurs à plaques)
- ❑ Injection à plusieurs niveaux



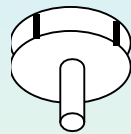
Température retour capteur



Thèse : K. Johannes (LOCIE, CLIPSOL, RRA)



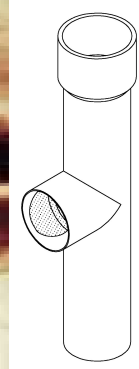
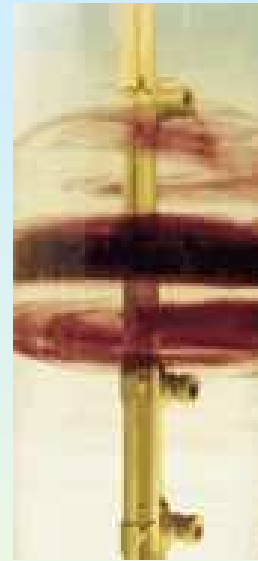
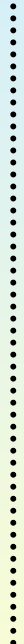
■ Autres dispositifs



Shah

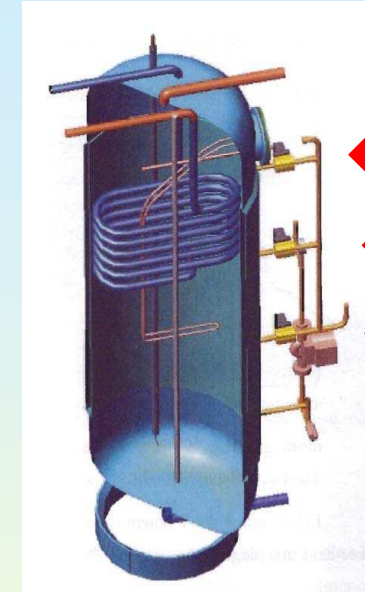
Carlsson

Injection d'eau froide



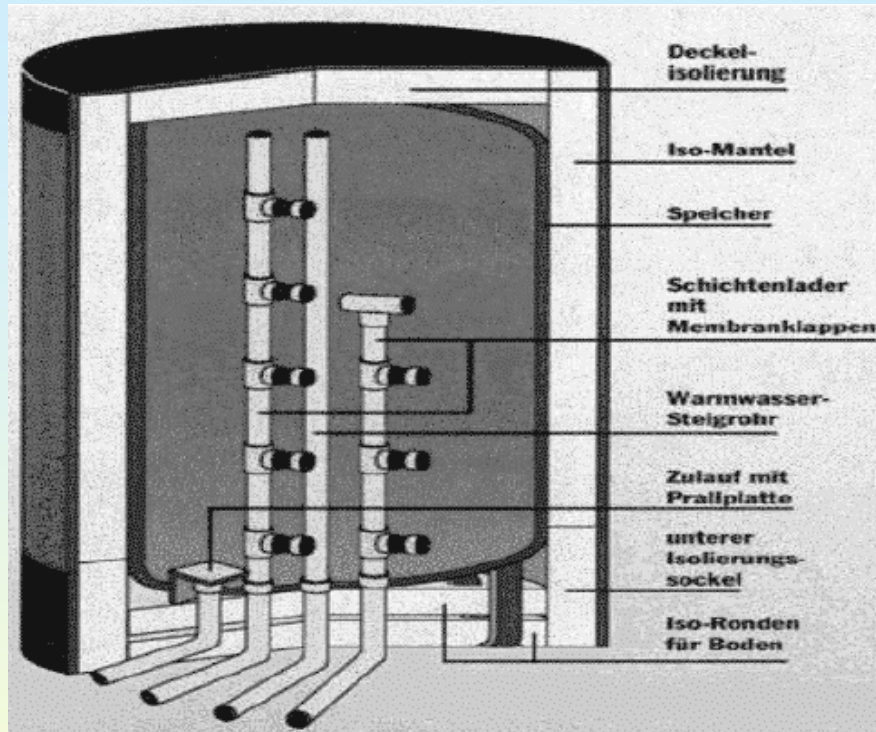
Solvis

Injection mutli-niveaux  
d'eau solaire

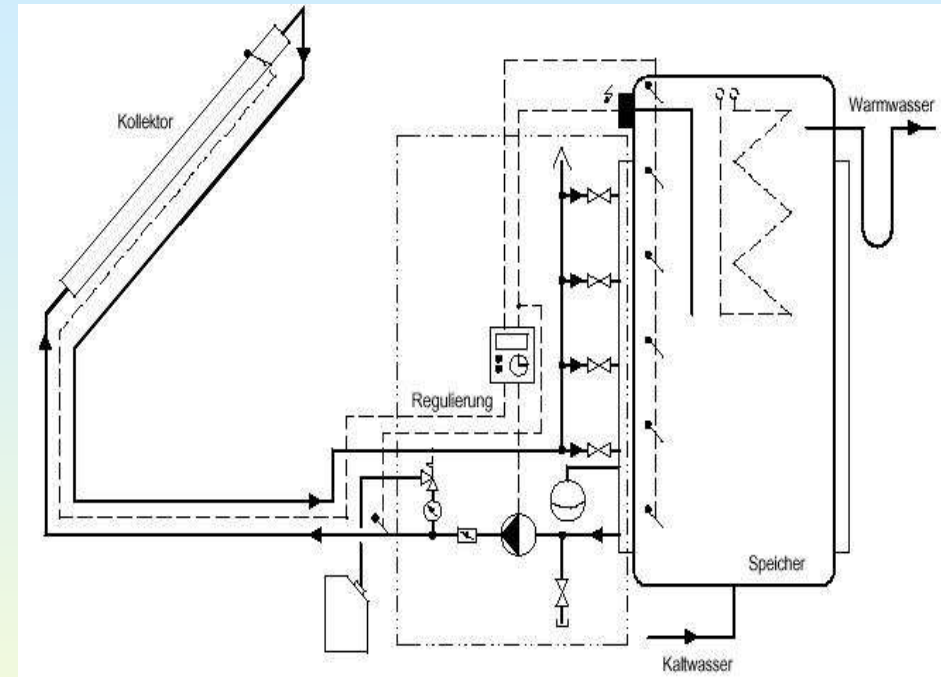


Agena

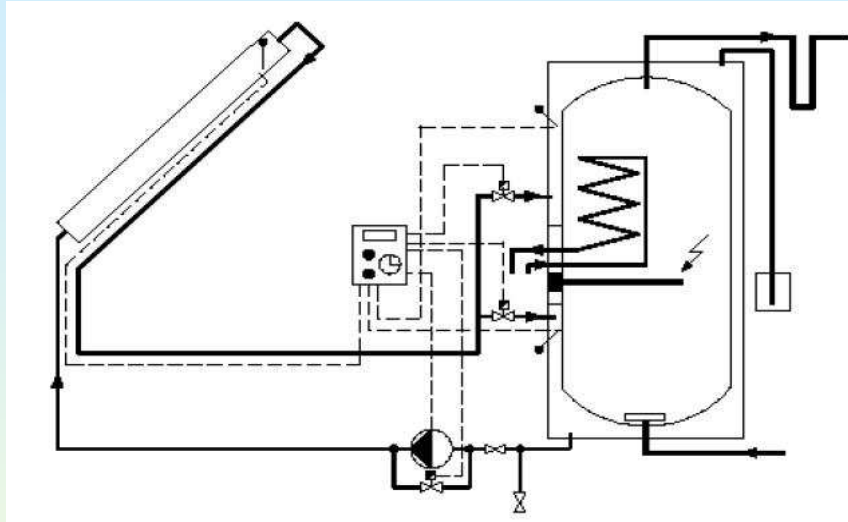
## ■ Solutions industrielles



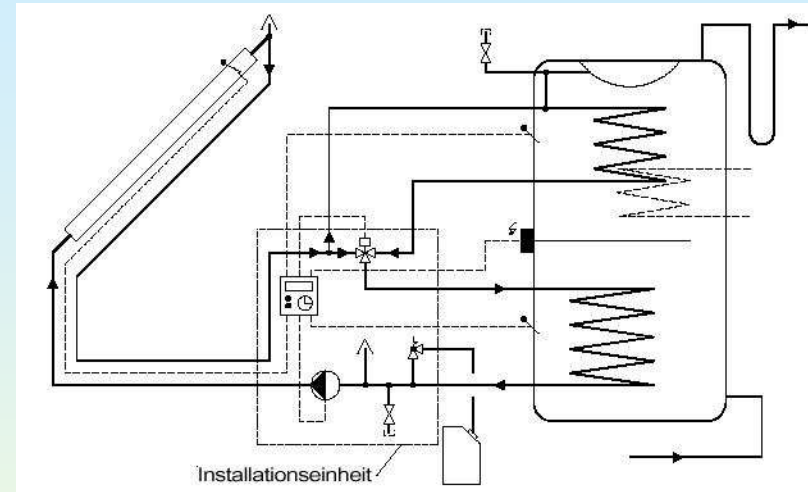
ballon Stratos



Kit Solaire d'AGENA :  
échangeur manteau + multi-niveaux



Kit Solaire Hoval :  
Double enveloppe + multi-niveaux



Le chauffe-eau solaire Minisol :  
2 échangeurs

## ■ Actuellement

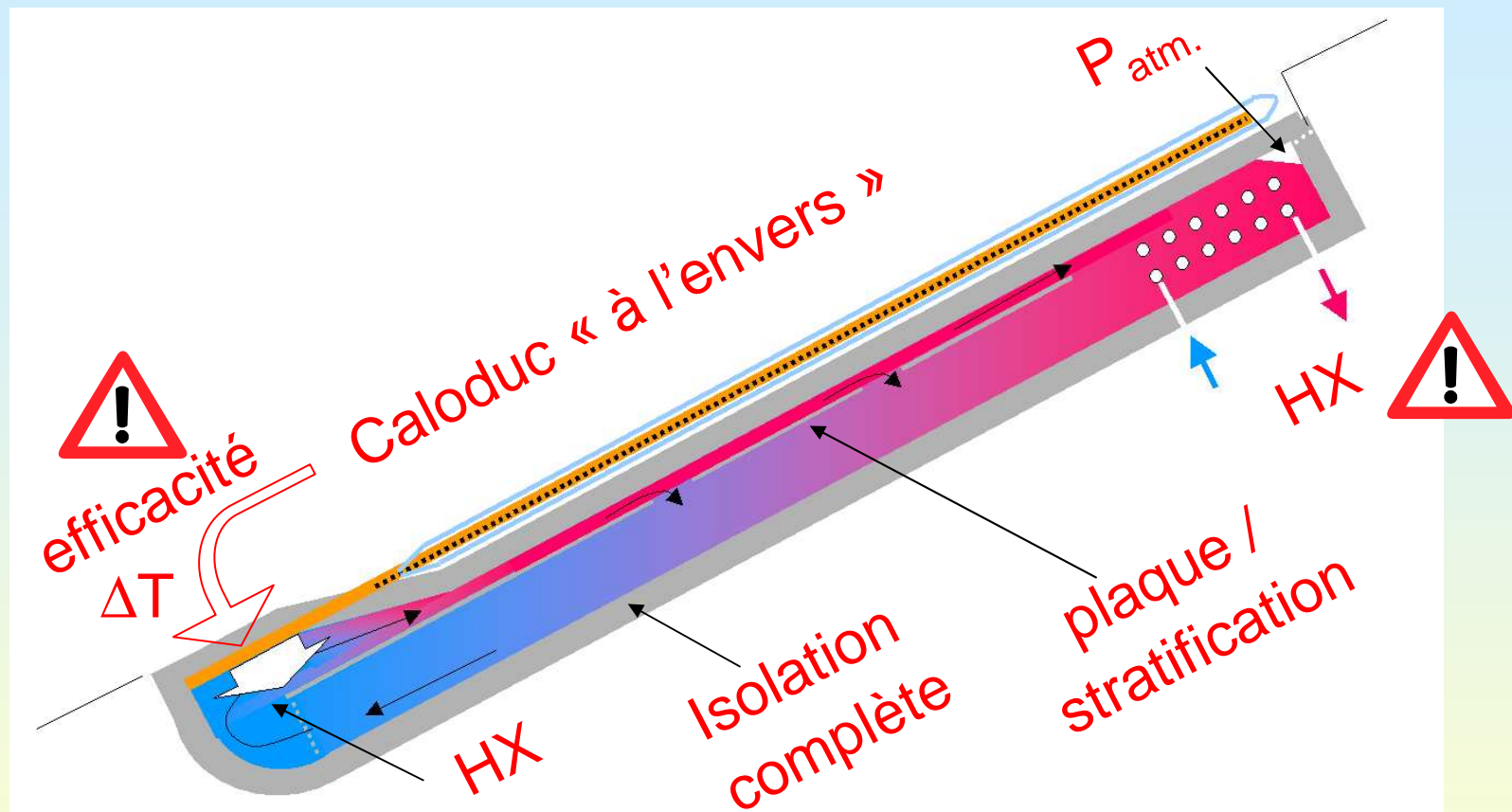


Polymères  
(coût)



- Esthétique ?
- Gel
- Pertes thermiques en métropole

## ■ Projet RénEauSol (Habisol-09)



- ❑ Esthétique (intégration) et isolation (gel et pertes thermiques)
- ❑ Efficacité : caloducs « à l'envers », plaque de stratification
- ❑ Passif = simplification (ni circulateur, ni régulateur)

# **4** Conclusions

## ■ Stockage solaire et efficacité énergétique

### □ Raisonner globalement

- ↪ Stratification = rendement capteur + appoint
- ↪ Simplification = performances in-situ
- ↪ Attention aux risques sanitaires (brûlure / légionellose)

### □ Différents moyens

- ↪ Eau : le plus simple
- ↪ MCP
- ↪ Béton : enveloppe du bâtiment
- ↪ Autre : chimique (2 thèses sur le stockage par absorption)

### □ Différents systèmes

- ↪ ECS, Chauffage, piscine ... T° différentes

### □ Conception optimisée

- ↪ Travaux de recherche : stratification, MCP, polymères (coût)
- ↪ Solutions industrielles : cannes, multi-niveaux, HX manteau ...

**Merci de votre attention**

