

# VERS L'OPTIMISATION DES PROPRIÉTÉS RADIATIVES ET GÉOMÉTRIQUES DES ABSORBEURS SOLAIRES VOLUMIQUES EN MOUSSE DE SIC

LABORATOIRE  
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX  
et ENERGIE SOLAIRE  
UPR 8521 du CNRS.  
conventionnée avec  
l'université de Perpignan  
PROCESSES, MATERIALS  
and SOLAR ENERGY  
LABORATORY

SÉBASTIEN MEY  
CYRIL CALIOT  
GILLES FLAMANT

GDR – ACCORT  
10 & 11 Oct. 12



ECOLE DES MINES D'ALBI

TFE – 2012

# PLAN

---

- 1. CONTEXTE & INTRODUCTION**
- 2. RÉCEPTEURS VOLUMIQUES – MODÈLE 1D**
- 3. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES**
- 4. EXPÉRIENCE & VALIDATION DU MODÈLE**
- 5. CONCLUSION & PERSPECTIVES**

# PLAN

---

## **1. CONTEXTE & INTRODUCTION**

## 2. RÉCEPTEURS VOLUMIQUES – MODÈLE 1D

## 3. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES

## 4. EXPÉRIENCE & VALIDATION DU MODÈLE

## 5. CONCLUSION & PERSPECTIVES

# CONTEXTE

---

## Projet OPTISOL (ANR-SEED)

Coordinateur : **Cyril CALIOT** (PROMES)

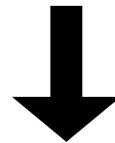
Partenaires : CIRIMAT – LTN – **PROMES** – SICAT Sarl

Tâche **1** : Optimisation numérique des propriétés volumiques d'absorbeurs

Tâche **5** : Tests de structures d'absorbeurs solaires à haute température

de **MARS** à **AOÛT 2012**...

- Stage** :
- > **Conception** d'un **homogénéisateur de flux** (*OPTISOL 5*)
  - > **Développement** d'un **modèle 1D** de **récepteur volumique** et **études paramétriques** (*OPTISOL 1*)
  - + Préparation pour une thèse → **Étude bibliographique**



à partir de **JANVIER 2013**...

**Thèse** : **Optimisation** d'un **récepteur volumique multicouche**

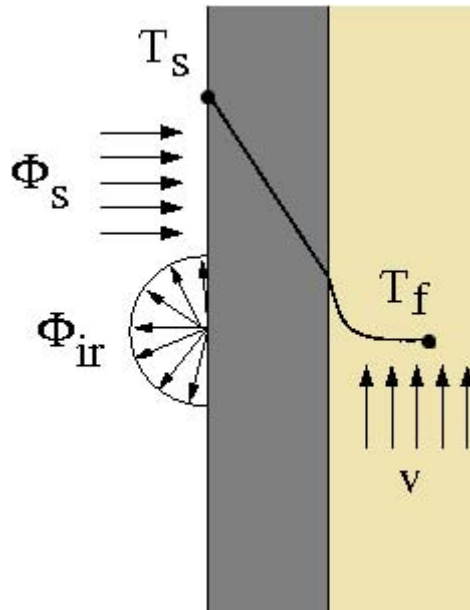
# INTRODUCTION (1)

## Rendement de CARNOT

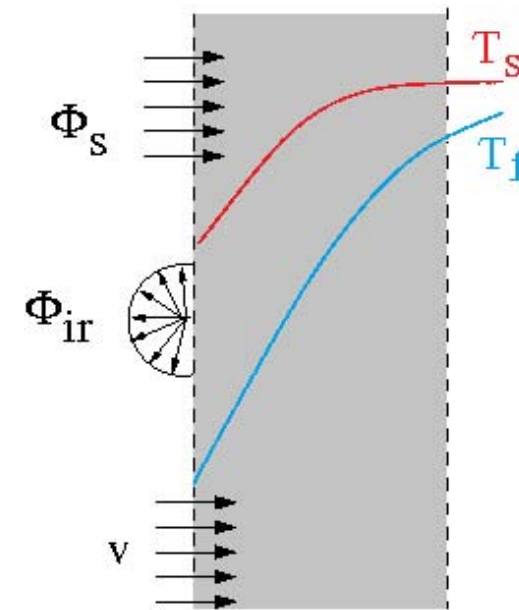
Plus la température du fluide de travail est élevée,  
plus le rendement du cycle thermodynamique sera élevé.

## Récepteurs SURFACIQUES –vs– Récepteurs VOLUMIQUES

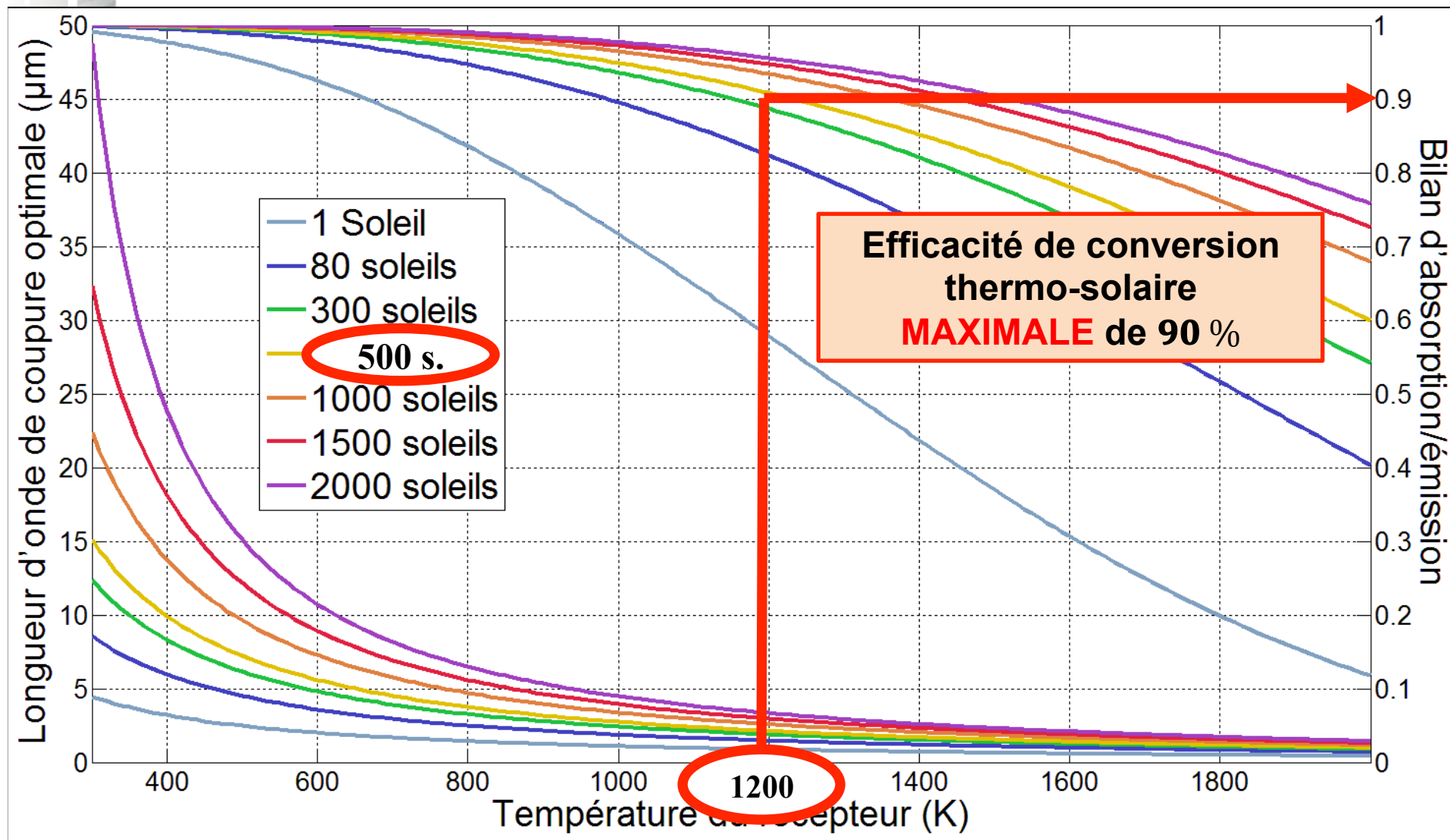
Utilisation des récepteurs surfacing  
**limitée en température**  
(*tenue thermomécanique, émission IR*)



**Intérêt double** pour les  
récepteurs volumiques  
(*meilleure résistance & effet volumique*)



# INTRODUCTION (2)

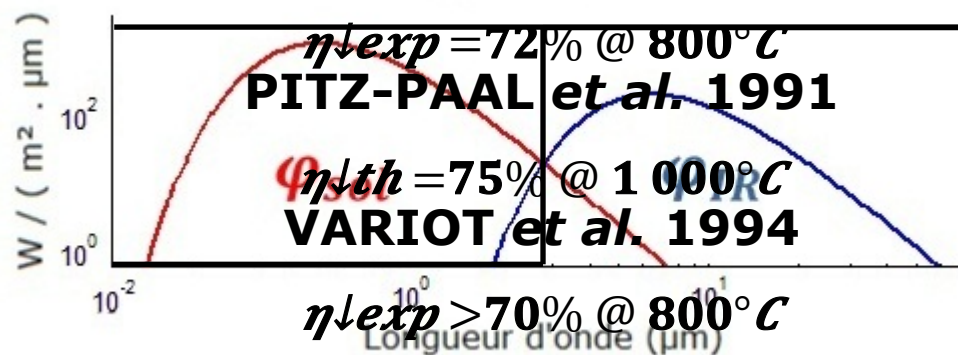


# INTRODUCTION (3)

## La SÉLECTIVITÉ VOLUMIQUE

### Couche n°2

$\alpha_{sol} = 0$     $\alpha = 1$     $\alpha_{IR} = 1$   
**MENIGAULT et al. 1991**



**CSP**

VERRE / QUARTZ  
 NID D'ABEILLE EN  
 SILICE

PARTICULES EN  
 CARBURE DE  
 SILICIUM

# PLAN

---

1. CONTEXTE & INTRODUCTION

**2. RÉCEPTEURS VOLUMIQUES – MODÈLE 1D**

3. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES

4. EXPÉRIENCE & VALIDATION DU MODÈLE

5. CONCLUSION & PERSPECTIVES



2.

# LES RÉCEPTEURS VOLUMIQUES

## Objectif futur

**Optimisation** d'un récepteur volumique

- Outils de **simulations**
- Sujet du **stage**

Propriétés  
des phases

Géométrie

Milieu effectif

Modèle

- Propriétés **radiatives**
- Propriétés **volumiques**

Quel(s) modèle(s) de milieu effectif pour quel milieu poreux ?



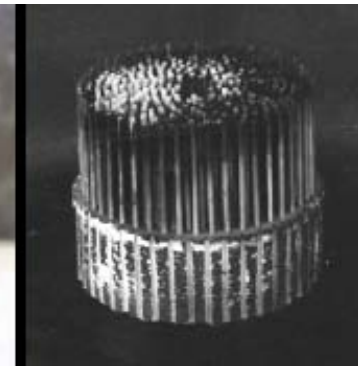
Les CANAUX



Les MOUSSES



Les FIBRES



Les TIGES



Les FILS

# MODÈLE 1D (1)

## HYPOTHÈSES

### Fluide

- Fluide dilatable
- Gaz Parfait

### Solide

- Optiquement gris

### Equations

- Régime permanent établi
- Énergie cinétique négligée
- Effets visqueux négligés

### Milieu poreux

- Mousse
- Homogène
- Optiquement épais

## MODÈLE MATHÉMATIQUE

### • Écoulement

$$CM : v \downarrow D = m / A \rho \downarrow f$$

$$QdM : -\nabla P = m / A \phi \uparrow 2 \nabla v \downarrow D + \mu \downarrow f / K \downarrow 1 v \downarrow D + \rho \downarrow f / K \downarrow 2 v \downarrow D v \downarrow D$$

### • Transferts de chaleur

$$F: \nabla \cdot (\rho \downarrow f C \downarrow f T \downarrow f v \downarrow D) = \nabla (k \downarrow f \uparrow \nabla T \downarrow f) + h \downarrow v (T \downarrow s - T \downarrow f)$$

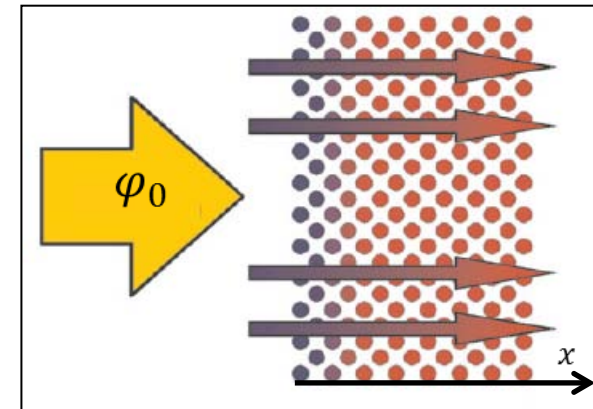
$$S: 0 = \nabla (k \downarrow s \uparrow \nabla T \downarrow s) + h \downarrow v (T \downarrow f - T \downarrow s) - \nabla q \downarrow r$$

### • Rayonnement - Modèle P1

$$-\nabla (1/3 (\kappa + \sigma) \nabla G \downarrow s) = \kappa (4 \sigma \downarrow SB T \downarrow s \uparrow 4 - G \downarrow s) + \sigma G \downarrow d$$

$$\nabla q \downarrow r = \kappa (4 \sigma \downarrow SB T \downarrow s \uparrow 4 - (G \downarrow s + G \downarrow d))$$

## GÉOMÉTRIE - 1D



# MODÈLE 1D (2)

## MODÈLE DE PROPRIÉTÉS

- Conductivités thermiques effectives :  $k_{\downarrow f}^*$  et  $k_{\downarrow s}^*$
- Coefficient volumique d'échanges convectifs :  $h_{\downarrow v}$
- Perméabilité visqueuse :  $K_{\downarrow 1}$
- Perméabilité inertielle :  $K_{\downarrow 2}$
- Coefficient d'absorption :  $\kappa = 3/2 \alpha(1-\phi)/d$
- Coefficient de diffusion :  $\sigma = 3/2 (1-\alpha)(1-\phi)/d$

**WU et al. 2011**

*Coefficients valables pour certaines conditions d'utilisation.*

## CONDITIONS FRONTIÈRES

- Écoulement :  $(P_{\downarrow r})_{\downarrow out} = 0$
- Température fluide :  $(T_{\downarrow f})_{\downarrow in} = T_{\downarrow amb}$  &  $(\nabla T_{\downarrow f})_{\downarrow out} = 0$
- Température solide :  $(\nabla T_{\downarrow s})_{\downarrow in} = (\nabla T_{\downarrow s})_{\downarrow out} = 0$
- Modèle P1 (Marshak) :  $D \nabla G_{\downarrow s} \cdot n = -G_{\downarrow s} / 2$

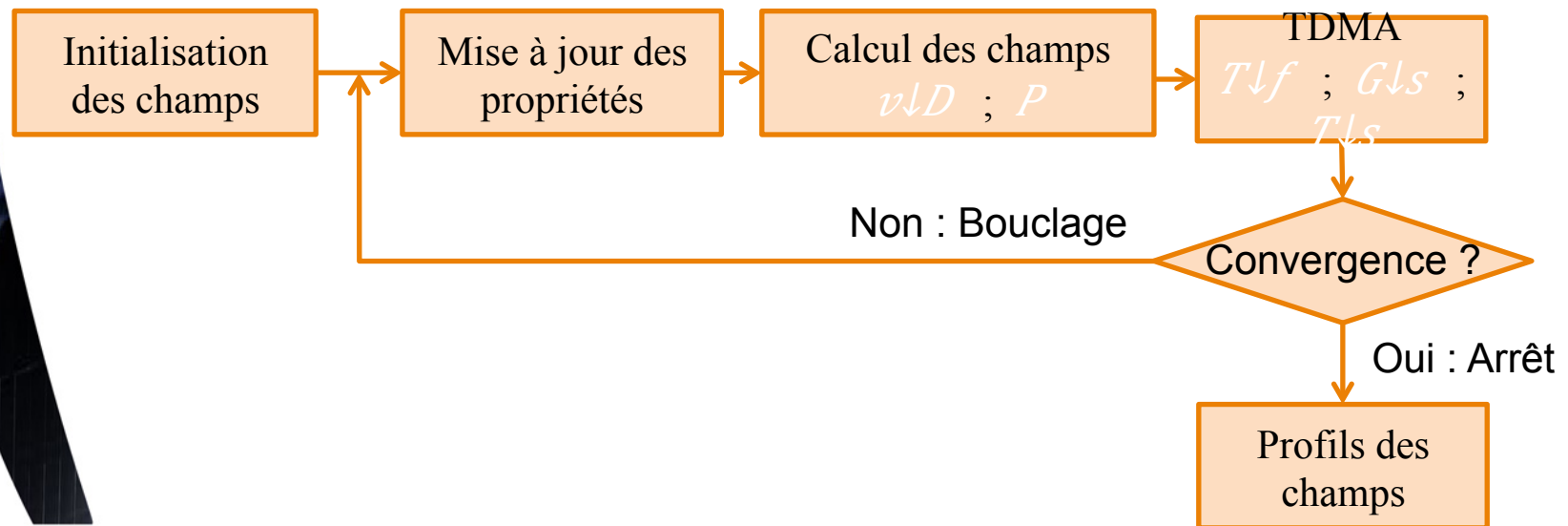
\* **WU, CALIOT, FLAMANT, and WANG 2011**, *Coupled radiation and flow modeling in ceramic foam volumetric solar air receivers*, Solar Energy 85 (2011), p. 2374-2385.

# MODÈLE 1D (3)

## DISCRÉTISATION DES ÉQUATIONS

- Méthodes des **Volumes Finis** et des **Différences Finies**
  - **Schéma amont** (*Upwind*) pour les termes d'advection
  - **Schéma centré** pour les termes de diffusion
- 1<sup>er</sup> Ordre** → Algorithme de **THOMAS** (TDMA)

## ORGANIGRAMME DE RÉOLUTION



# PLAN

---

1. CONTEXTE & INTRODUCTION
2. RÉCEPTEURS VOLUMIQUES – MODÈLE 1D
- 3. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES**
4. EXPÉRIENCE & VALIDATION DU MODÈLE
5. CONCLUSION & PERSPECTIVES

# ÉTUDES PARAMÉTRIQUES (1)

## INFLUENCES OBSERVÉES SUR...

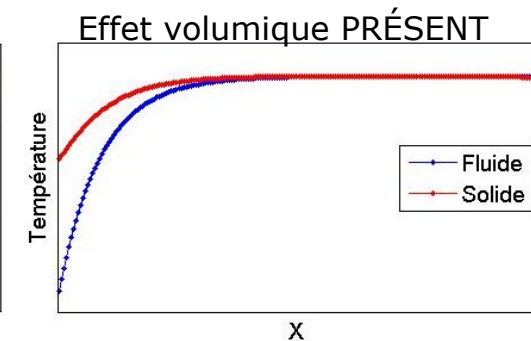
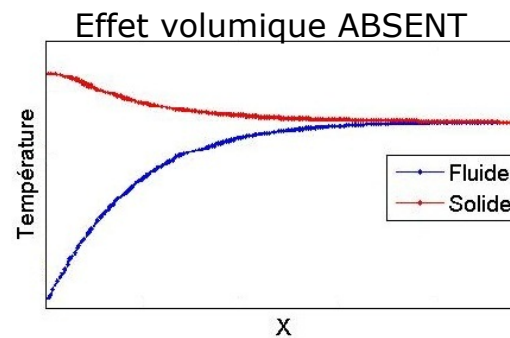
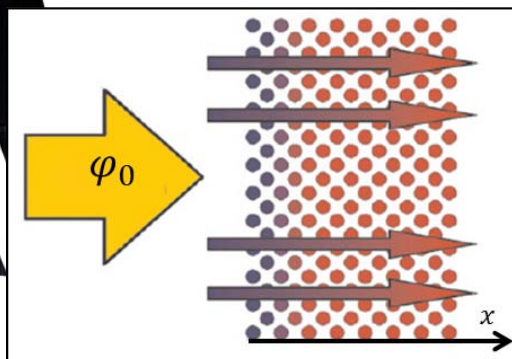
- L'**efficacité** de conversion thermo-solaire  $\eta \downarrow CTS = \Delta H \downarrow f / A \cdot \phi \downarrow 0$
- La température de **sortie d'air**  $T \downarrow f, out$

## ... DE QUATRE PARAMÈTRES

- Le **débit massique d'air** ( $m \in ]0;10] g/s$ )
- La **porosité** ( $0,70 \leq \phi \leq 0,90$ )
- La **conductivité thermique du solide massif** ( $k \downarrow s \in \{1;10;100\} W/m/K$ )
- Le **diamètre de pores** ( $1 \leq d \leq 2 mm$ )

## EFFET VOLUMIQUE : $T \downarrow s, in < T \downarrow f, out$

### GÉOMÉTRIE - 1D



# ÉTUDES PARAMÉTRIQUES (2)

## GRANDEURS PHYSIQUES

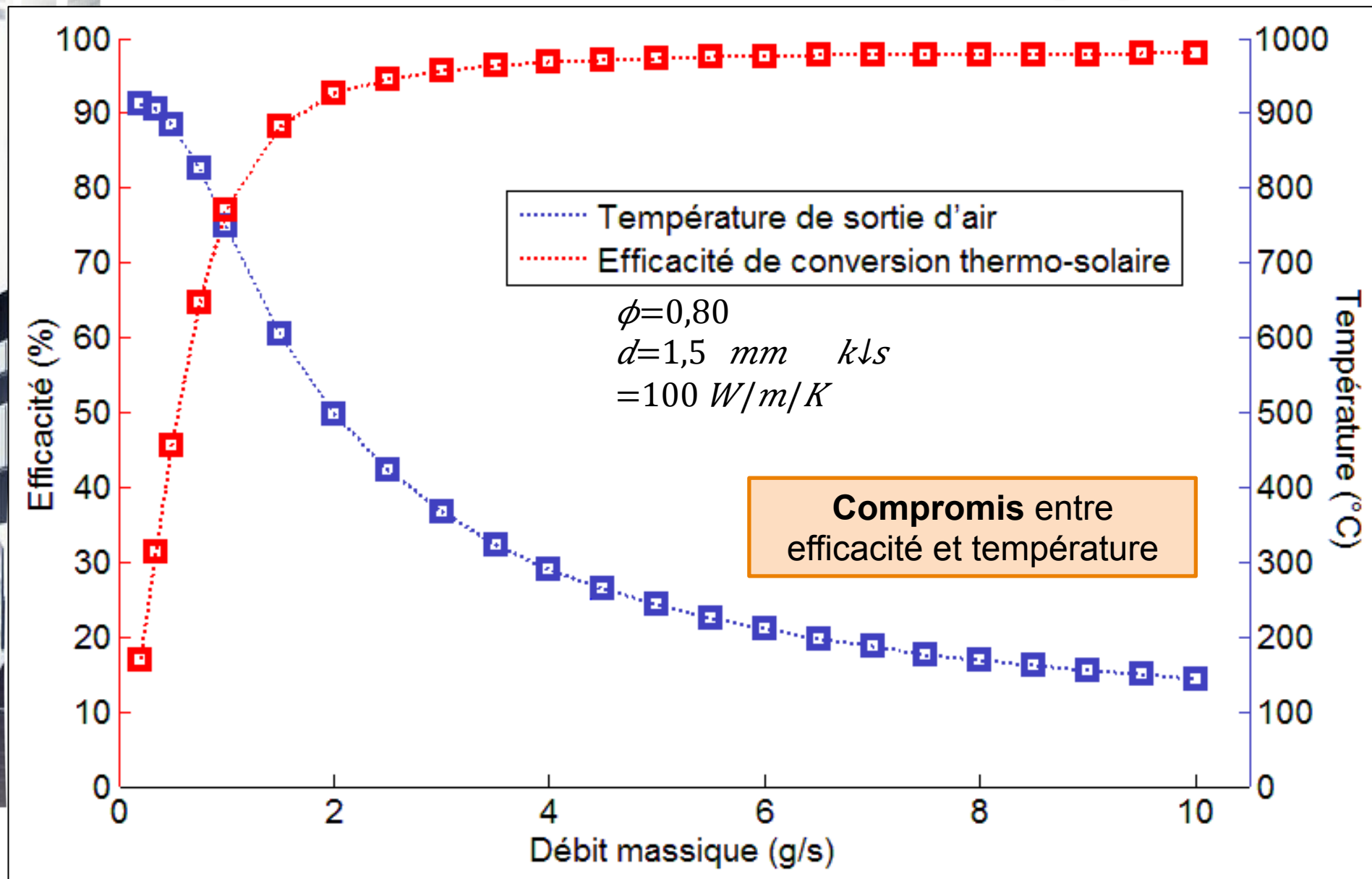
- Densité de flux incidente uniforme :  $\phi_{\downarrow 0} = 600 \text{ kW/m}^2$  ;
- Température ambiante (référence) :  $T_{\downarrow amb} = 300 \text{ K}$  ;
- Pression atmosphérique (référence) :  $P_{\downarrow atm} = 101\,325 \text{ Pa}$  ;
- Diamètre et longueur du récepteur :  $L = D = 5 \text{ cm}$  ;
- Absorptivité du matériau solide massif :  $\alpha = 0,95$ .

## PARAMÈTRES PAR DÉFAUT

- Porosité :  $\phi = 0,80$  ;
- Diamètre de pores :  $d = 1,5 \text{ mm}$  ;
- Conductivité thermique du matériau solide massif :  $k_{\downarrow s} = 100 \text{ W/m/K}$  ;
- Débit massique de fluide :  $m = 1,5 \text{ g/s}$ .

5.

# DÉBIT MASSIQUE D'AIR (1)

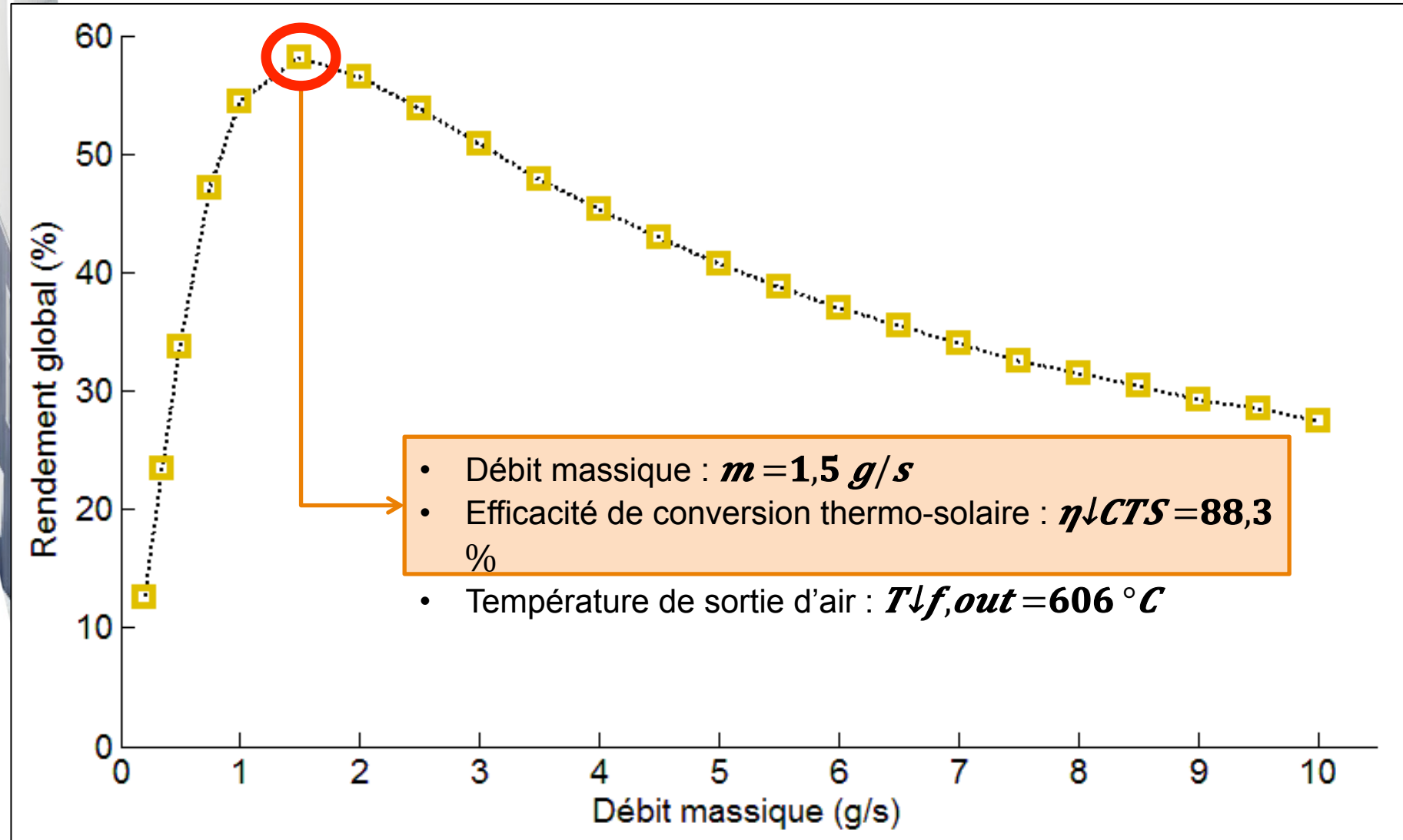




5.

## DÉBIT MASSIQUE D'AIR (2)

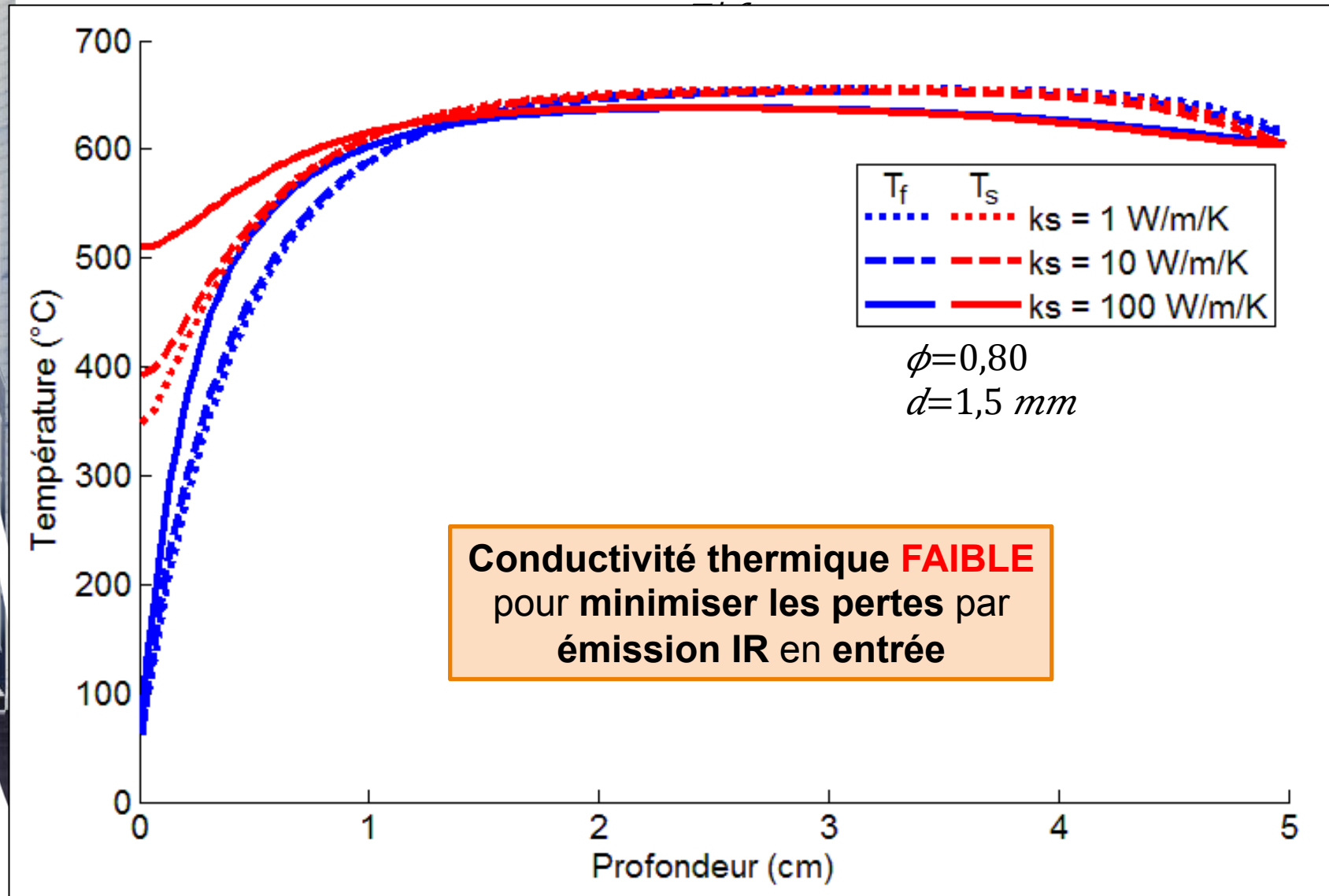
Rendement global :  $(\Delta H_{\downarrow f} / A \cdot \phi_{\downarrow 0}) \cdot (1 - T_{\downarrow 0} / T_{\downarrow f, out})$



5.

# CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DU SOLIDE MASSIF

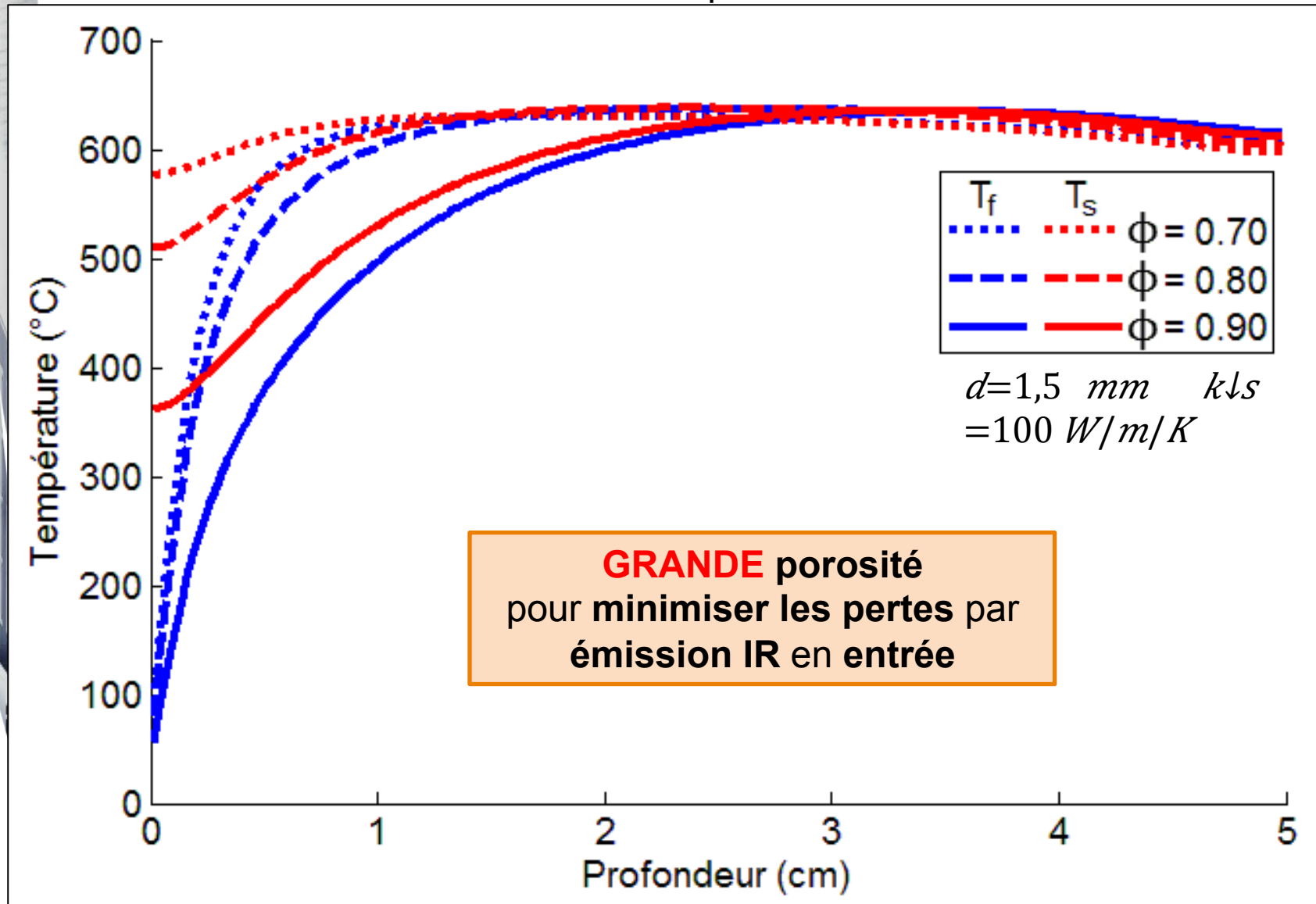
Profils de température :  $T_f$  et  $T_s$



5.

# POROSITÉ

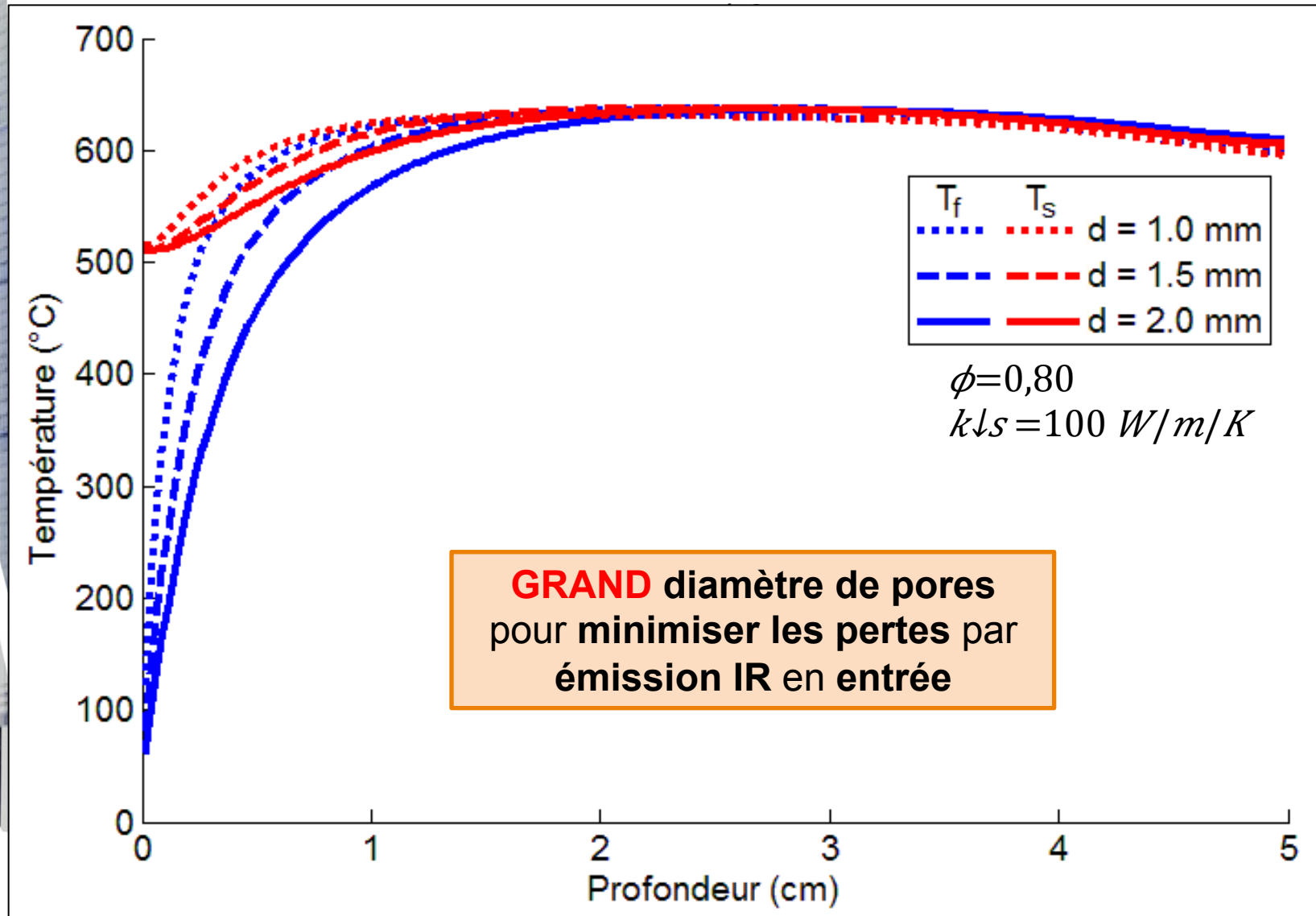
Profils de température :  $T_f$  et  $T_s$



5.

# DIAMÈTRE DE PORES

Profils de température :  $T_f$  et  $T_s$



# SYNTHÈSE

Pour une augmentation des paramètres, voici les effets observés :

Paramètre	$\eta \downarrow CTS$	$T \downarrow f, out$	$\tau = \beta \cdot L$
$m$	$\nearrow$	$\searrow$	10
$k \downarrow s$	$\searrow$	$\searrow$	10
$\phi$	$\nearrow$	$\nearrow$	5 à 15
$d$	$\nearrow$	$\nearrow$	7,5 à 15

## MILIEU POREUX « IDÉAL »

- **FAIBLE** conductivité thermique  
→ matériau thermiquement isolant
- **GRANDE** porosité  
→ brins de solide fins
- **GRAND** diamètre de pores  
→ brins de solide espacés

Dans les limites de nos hypothèses  
 $\tau \downarrow min = 3,75$

# PLAN

---

1. CONTEXTE & INTRODUCTION
2. RÉCEPTEURS VOLUMIQUES – MODÈLE 1D
3. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES
- 4. EXPÉRIENCE & VALIDATION DU MODÈLE**
5. CONCLUSION & PERSPECTIVES

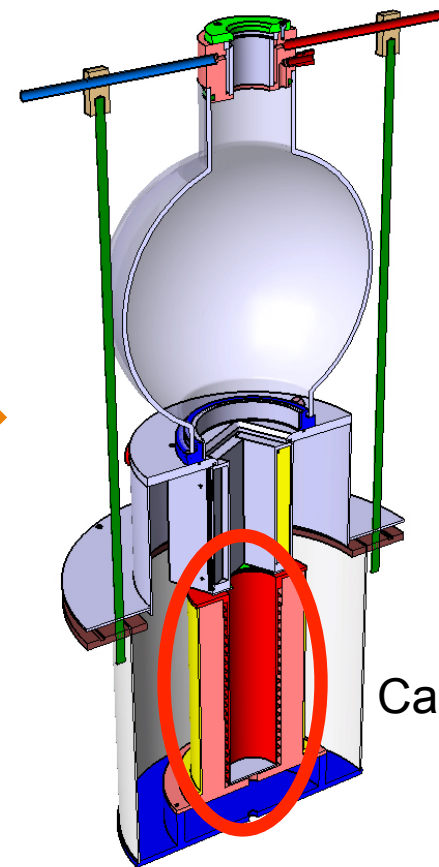
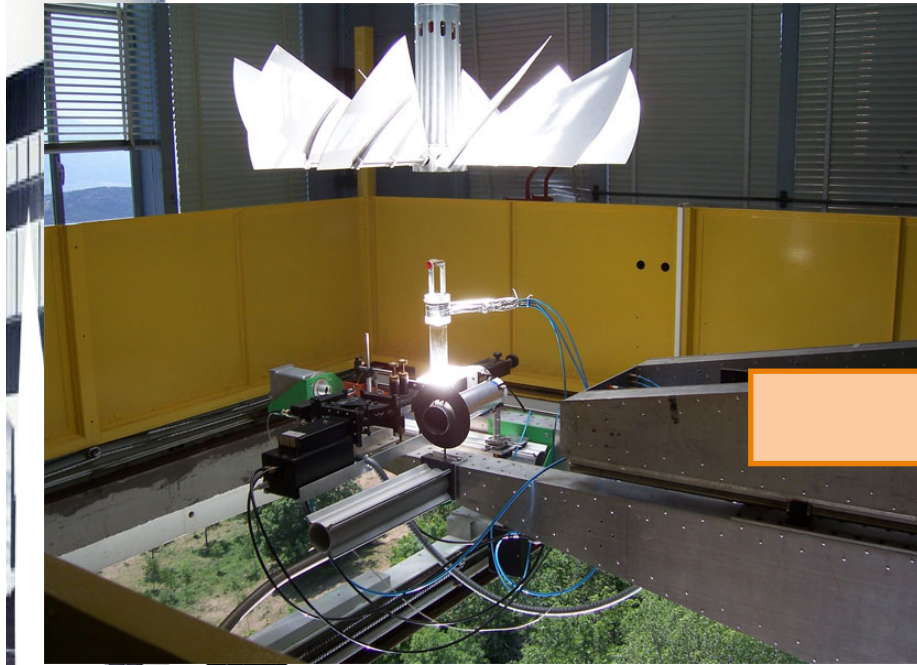
3.

# VALIDATION EXPÉRIMENTALE (1)

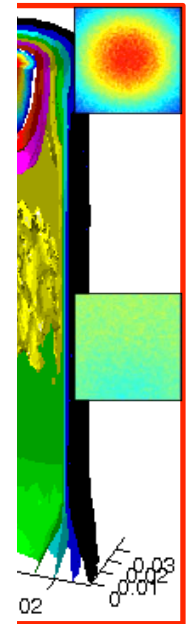
## Conception : 3 parties escamotables

Four vertical « 6 kW »  
d'Odeillo

→ Portocaléchaétien



→ Simulations  
**SOLFAST-4D**



# PLAN

---

1. CONTEXTE & INTRODUCTION
2. RÉCEPTEURS VOLUMIQUES – MODÈLE 1D
3. ÉTUDES PARAMÉTRIQUES
4. EXPÉRIENCE & VALIDATION DU MODÈLE
- 5. CONCLUSION & PERSPECTIVES**



## CONCLUSION & PERSPECTIVES

---

### → CONCLUSION : **STAGE (ÉTÉ 2012)**

- **Étude bibliographique**
- **Dimensionnement d'un homogénéisateur de flux**
  - En cours de fabrication
- **Développement d'un modèle 1D de récepteur volumique**
  - **Milieu poreux idéal** : Thermiquement **isolant**  
**Brins solide fins et espacés**

### → PERSPECTIVES : **THÈSE (JAN. 2013)**

- **Etude bibliographique** : Transferts en milieux poreux  
Modèles de **milieux effectifs**
- **Modèle 1D** : **Validation** du modèle sur l'**expérience**  
**Modèles radiatifs** → Ordonnées discrètes / MMC
  - Compromis ( $\eta \downarrow CTS; T \downarrow f, out$ ) : Récepteurs **multicouches**  
**Sélectivité volumique**
- **Optimisation numérique** des propriétés

# MERCI DE VOTRE ATTENTION

