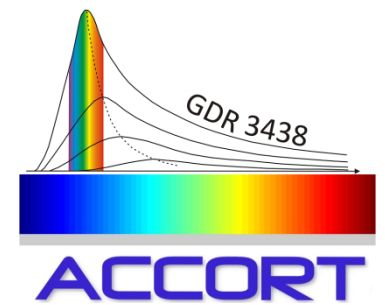


Modélisation des transferts couplés dans les récepteurs-réacteurs solaires à haute température



Dr. Cyril Caliot
Chargé de Recherche CNRS

Dr. Gilles Flamant
Directeur de Recherche CNRS

Doctorants

Florent Larrouturou

Sébastien Mey

Freddy Ordonez

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



Plan

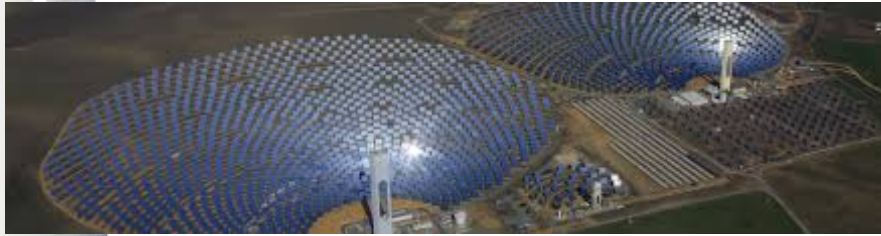
- **Introduction**
- **Transferts couplés dans un réacteur solaire haute température de craquage de méthane (Solhycarb)**
- **Transferts couplés dans des récepteurs solaires volumiques haute température (Optisol)**



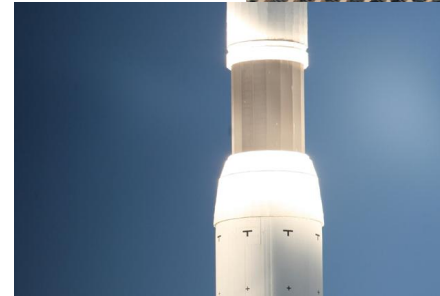
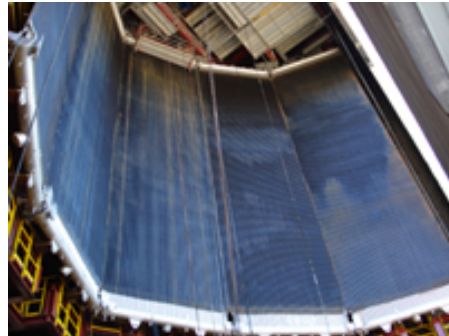
SIXTH FRAMEWORK
PROGRAMME



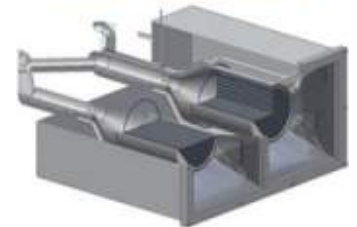
Récepteurs et récepteurs-réacteurs solaires



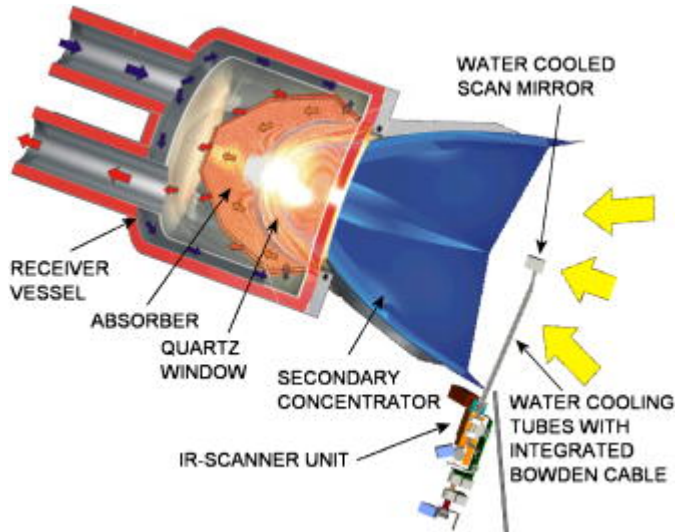
PS20



GEMASOLAR



SOLGATE



HYDROSOL

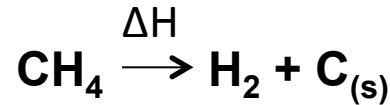
Introduction

En combinant

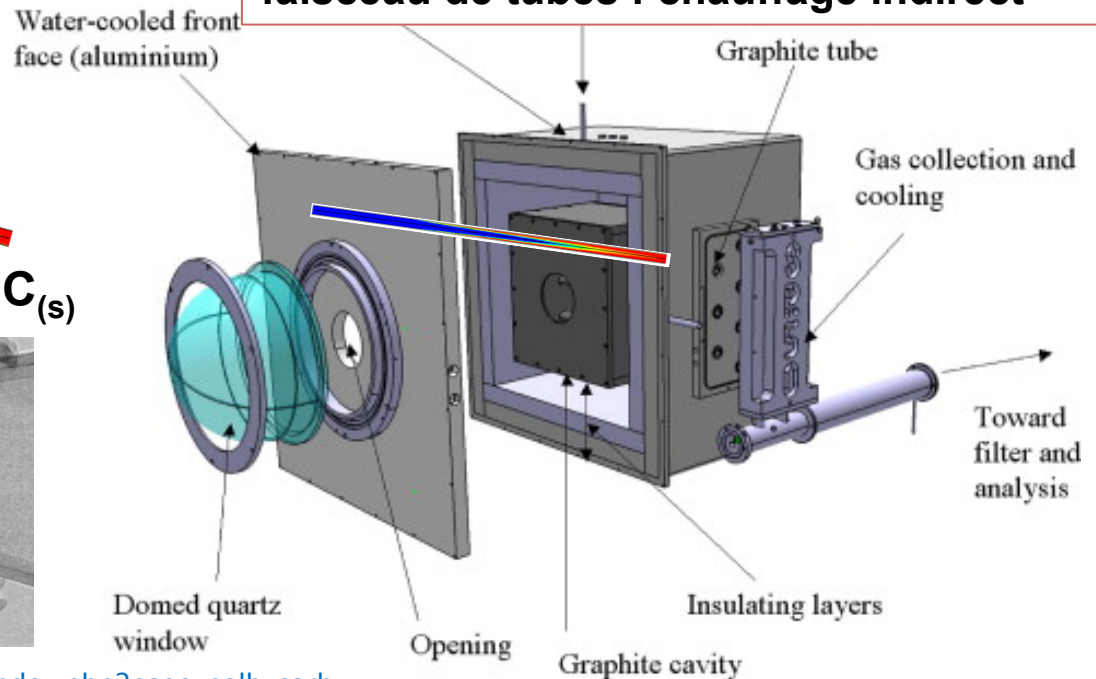
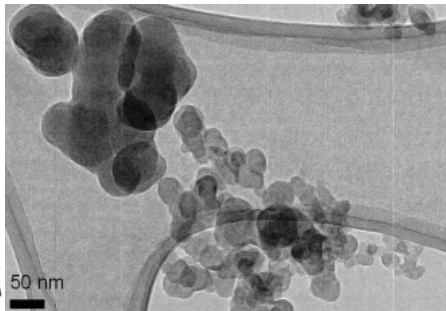
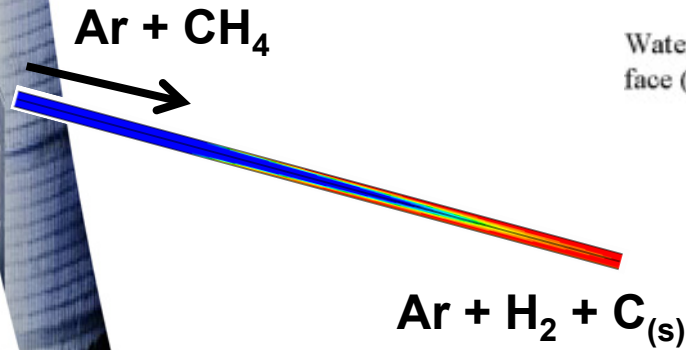
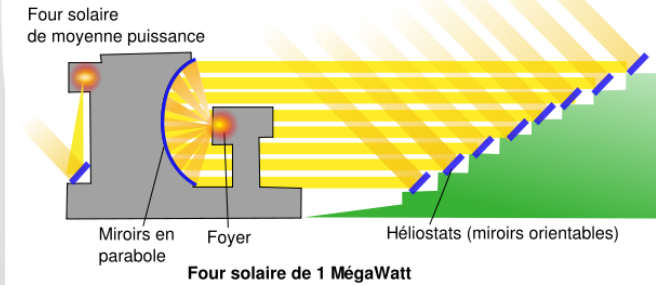
- ***la construction de modèles de transferts couplés***
 - thermique avec ***rayonnement***,
 - écoulement,
 - réactions chimiques,
 - croissance de particules, etc.
- ***avec des expériences de validation*** des modèles et des concepts
- **on améliore**
 - ***la compréhension des processus*** qui pilotent l'efficacité des procédés solaires et
 - ***Les procédés solaires*** en réalisant des études paramétriques ou une optimisation.

Réacteur de craquage du méthane (50kW)

- **Projet Européen FP6 SOLHYCARB**



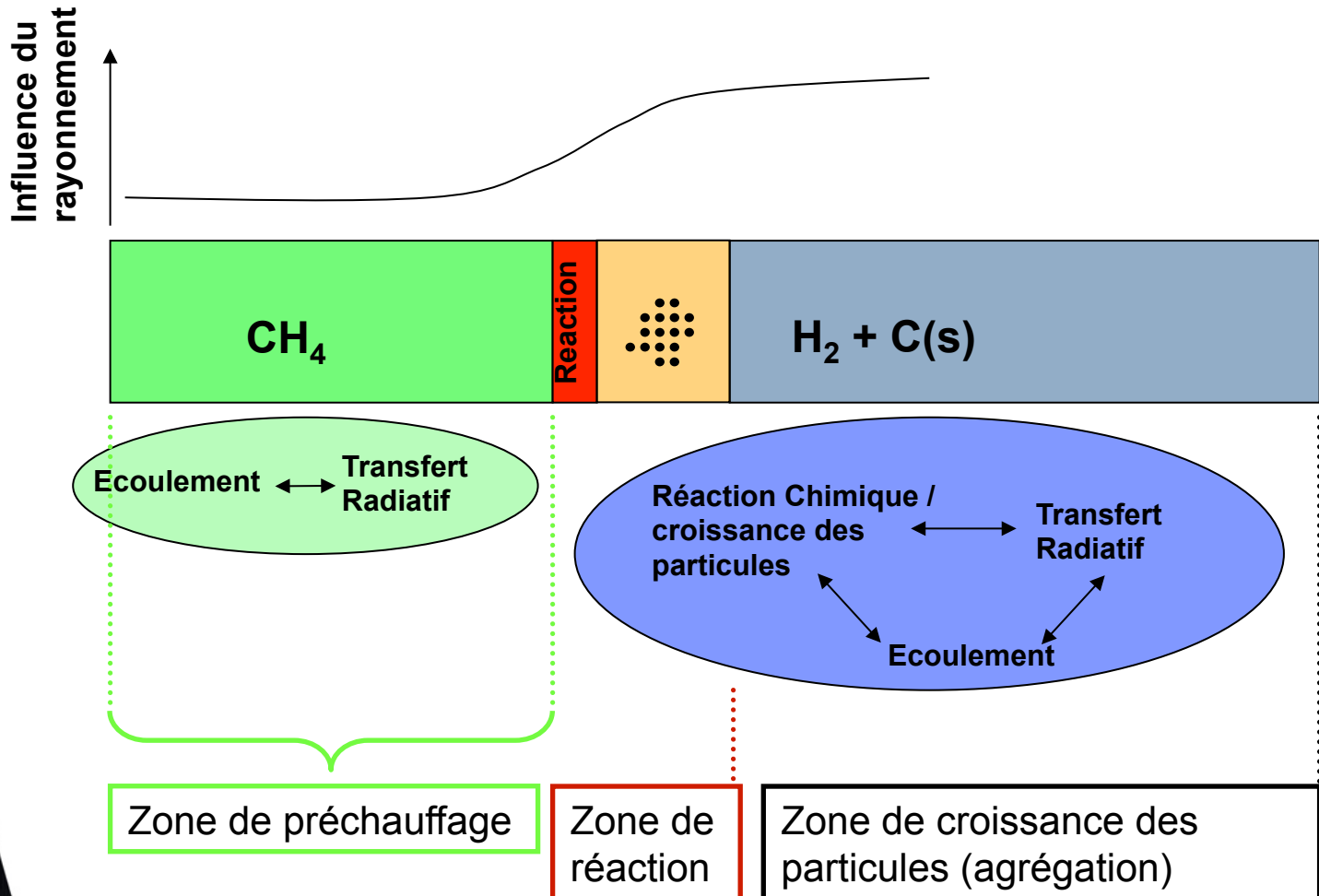
Le flux solaire fait monter la température de la cavité isolée (1900K) comportant un faisceau de tubes : chauffage indirect



<http://www.promes.cnrs.fr/index.php?page=solhycarb>

C. Caliot, PROMES-CNRS, Journée SFT sur le rayonnement et les transferts couplés (21/10/2014 E. Hamelin, Paris)

Influence des transferts radiatifs



Objectifs et démarche

- **Objectifs**
 - Développer un **modèle** complet du **réacteur** et le **valider**
 - Etudier **l'influence des transferts radiatifs** dans le réacteur

- **Démarche**
 - Développer un modèle de **propriétés radiatives** pour le **CH₄** et **C_(s)** à haute température
 - **Simuler** les transferts couplés avec formation de noirs de carbone dans un réacteur tubulaire

Propriétés radiatives ($\text{CH}_4 + \text{NC}$) haute température

□ CH_4 : base de données spectroscopiques

à haute température

Lab. EM2C (Fr.)

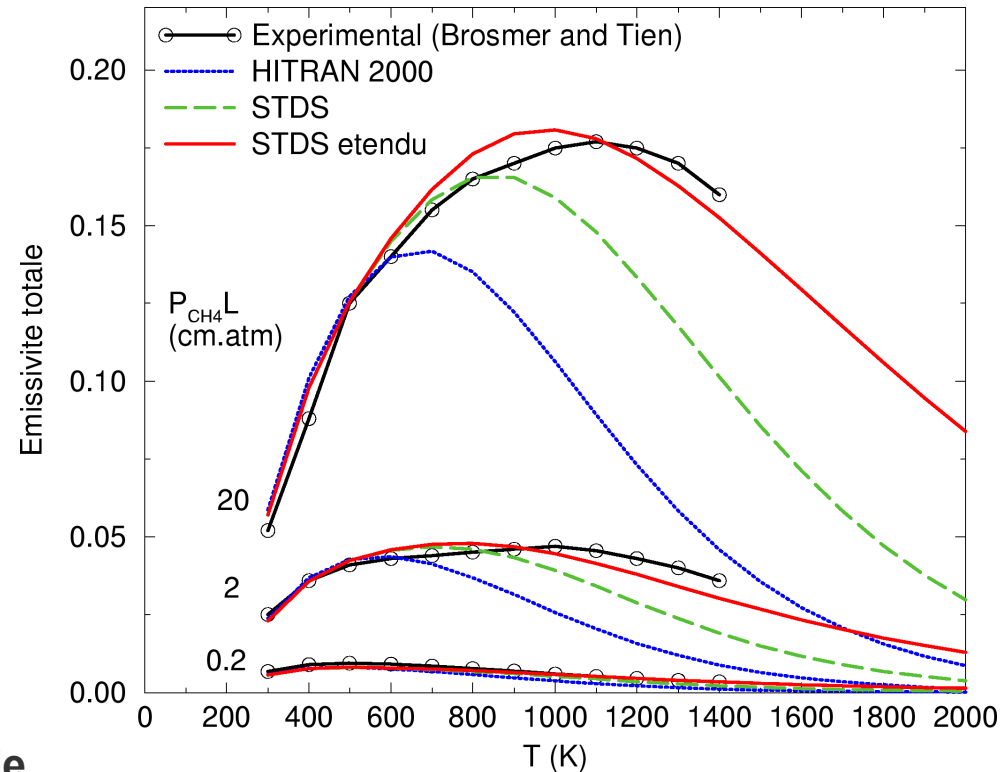
=> STDS étendu

M.-Y. Perrin, A. Soufiani

JQSRT, vol.103, 2007.

=> CH_4 bandes étroites SNB

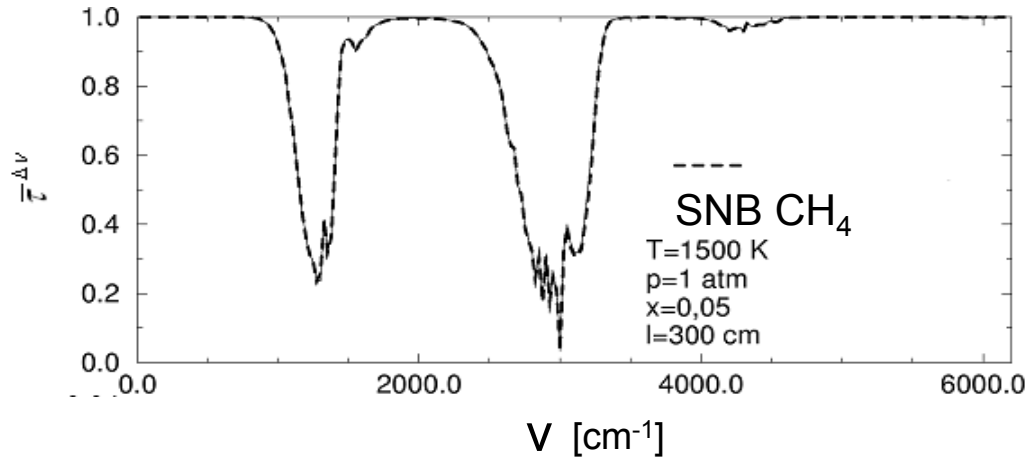
□ Noirs de carbone :
moyenne de Planck (T_{wall})
des efficacités d'absorption
pour la distribution de taille de
sphères (Mie)



Emissivité du méthane en fonction de la température obtenue avec différentes bases de données spectroscopiques

Propriétés radiatives du CH₄ à haute température

- ❑ **Modèle statistique de bandes étroites ($\Delta\nu=25\text{cm}^{-1}$)**
modèle SNB, profil de raie Lorentz, distribut. Intens. de Malkmus



$$\bar{\tau}^{\Delta\nu} = \exp \left[-\frac{2\bar{\gamma}}{\delta} \left(\sqrt{1 + xpl \bar{k} \frac{\bar{\delta}}{\bar{\gamma}}} - 1 \right) \right]$$

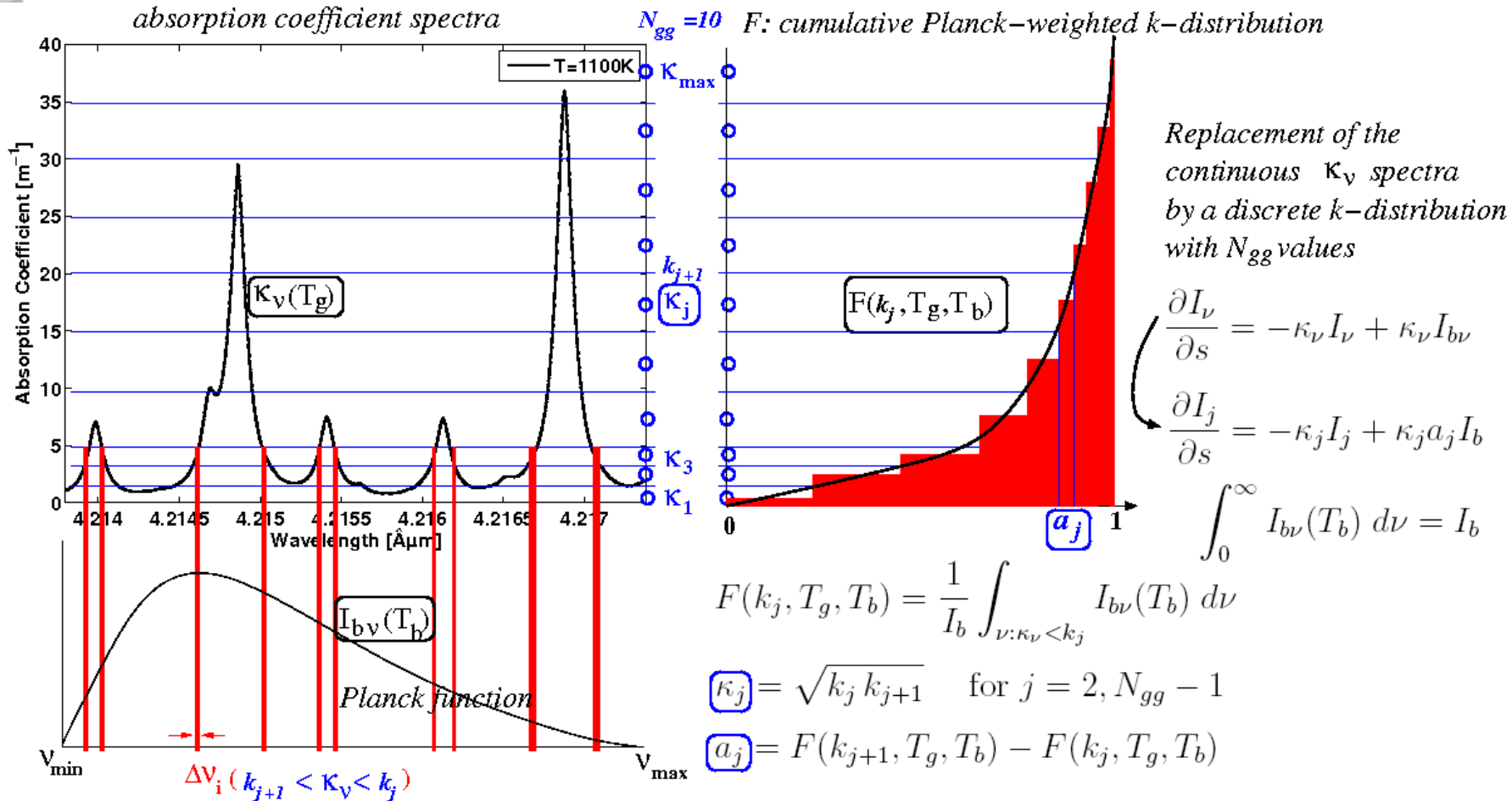
- ❑ **Modèle de la fonction de distribution d'absorption**
modèle ADF (10 groupes)

$$F(k, T_g, T_p) = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_{\nu/\kappa_\nu(T_g) < k} L_\nu^0(T_p) d\nu \quad a_i(T) = F(k_i^+(T), T, T) - F(k_i^-(T), T, T)$$

Modèles spectraux globaux pour les propriétés radiatives de gaz à haute température

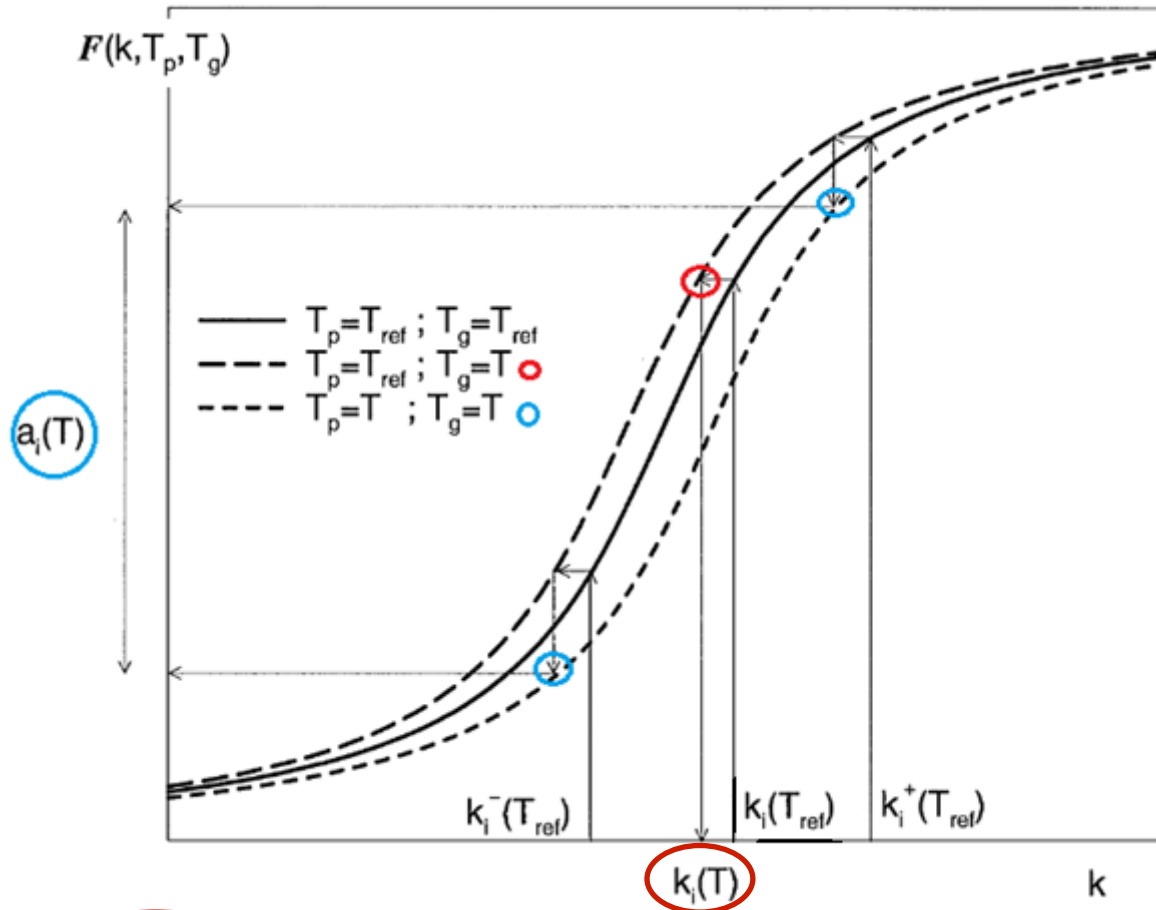
- **Gris (moyenne de Planck)**
- **WSGG (somme pondérée de gaz gris)**
- **EWB (exponentielle à bande large)**
- **ALBDF (K-distributions sur le spectre pondérées par la fonction de Planck)**
 - **SLW, ADF (N_{gg} gaz gris)**
 - **FCK, FSK (N_q quadratures)**

Principe d'ordonnement du spectre



$$\mathcal{F} \left[\begin{array}{c} \text{gas local} \\ k_i(x, p, T_g) \end{array}, \begin{array}{c} \text{Planck} \\ \text{reference} \\ T_{b\text{ref}}, x, p, T_g \end{array} \right] = \mathcal{F} \left[\begin{array}{c} \text{gas local} \\ k_i(x_{\text{ref}}, p_{\text{ref}}, T_{\text{ref}}) \end{array}, \begin{array}{c} \text{reference conditions} \\ T_{\text{ref}}, x_{\text{ref}}, p_{\text{ref}}, T_{\text{ref}} \end{array} \right]$$

Principe du modèle spectral ADF



Emissivité totale d'une colonne homogène isotherme

$$\mathcal{F}[k_i(x, p, T), T_{ref}, x, p, T] = \mathcal{F}[k_i(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T_{ref}, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}]$$

$$a_i(x, p, T) = \mathcal{F}[k_i^+(x, p, T), T, x, p, T] - \mathcal{F}[k_i^-(x, p, T), T, x, p, T]$$

Modèle des transferts couplés (1)

Continuité	$\frac{\partial}{\partial x_l}(\rho u_l) = 0$	
QdM	$\frac{\partial(\rho u_l u_k)}{\partial x_l} = -\frac{\partial p}{\partial x_k} + \mu \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_l^2}$	
Energie	$\frac{\partial}{\partial x_l}(\rho u_l h) = \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_l} - \sum_n h_n J_{n,l} \right) + S_{\text{chem}} + S_{\text{rad}}$	
Espèces et Particules 46 classes de tailles 2.6 Å – 8.4 μm	$\frac{\partial}{\partial x_l}(\rho u_l Y_n) = \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\rho D_{n,g} \frac{\partial Y_n}{\partial x_l} \right) + R_n$	$\text{CH}_4 \longrightarrow 2\text{H}_2 + \text{C(s)}$
	$h = \sum_n Y_n h_n \quad ; \quad h_n = \int_{T_r}^T C_{p,n} dT$	
ETR sans diff. pour des GG	$\frac{dI_j}{ds} = \kappa_j \left(a_j \frac{\sigma T^4}{\pi} - I_j \right)$	$\kappa_p = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^M Q_{\text{abs},i} d_i^2 N_i$

Modèle des transferts couplés (2)

Bilan des particules de NC
46 classes de tailles
Dia. : 2.6 Å – 8.4 μm
(max 21 μm)

$$R_1 = m_1 \left(\left[\dot{N}_1 \right]_{\text{hom}} + \left[\dot{N}_1 \right]_{\text{het}} + \left[\dot{N}_1 \right]_{\text{coag}} \right)$$

$$R_i = m_i \left(\left[\dot{N}_i \right]_{\text{het}} + \left[\dot{N}_i \right]_{\text{coag}} \right) \quad ; \quad i = 2, \dots, M$$

$$\left[\dot{N}_1 \right]_{\text{hom}} = k_{\text{hom}} c_{\text{CH}_4} \tilde{N}_A \quad k_{\text{hom}} = k_{0,\text{hom}} \exp \left(-\frac{E_{a,\text{hom}}}{RT} \right) \quad k_{\text{het}} = k_{0,\text{het}} \exp \left(-\frac{E_{a,\text{het}}}{RT} \right)$$

$$\left[\dot{N}_1 \right]_{\text{het}} = -H_{\text{het},1} N_1 \quad H_{\text{het},i} = \frac{k_{\text{het}} h_{\text{CH}_4,i}}{k_{\text{het}} + h_{\text{CH}_4,i}} \tilde{N}_A c_{\text{CH}_4} \frac{v_1}{v_i} s_i$$

$$\left[\dot{N}_i \right]_{\text{het}} = H_{\text{het},i-1} N_{i-1} - H_{\text{het},i} N_i \quad ; \quad i = 2, \dots, M$$

$$\left[\dot{N}_1 \right]_{\text{coag}} = - \sum_{j=1}^M K_{1,j} N_1 N_j$$

$$\left[\dot{N}_i \right]_{\text{coag}} = \sum_{j=1}^{i-1} (1 - 0.5\delta_{i-1,j}) \frac{2^{j-1}}{2^{i-1} - 2^{i-2}} K_{i-1,j} N_{i-1} N_j$$

$$+ \sum_{j=1}^i (1 - 0.5\delta_{i,j}) \frac{2^i - 2^{i-1} - 2^{j-1}}{2^i - 2^{i-1}} K_{i,j} N_i N_j$$

$$- \sum_{j=1}^M K_{i,j} N_i N_j \quad ; \quad i = 2, \dots, M$$

$E_{a,\text{hom}}$ 400 kJ/mol

$k_{0,\text{hom}}$ 10^{14} 1/s

$E_{a,\text{het}}$ 150 kJ/mol

$k_{0,\text{het}}$ 2500 m/s

Gain par coagulation de plus petites particules

Pertes par coagulation

Simulation des transferts couplés

- **Fluent : reg. stationnaire ; laminaire ; DO (4*4) multigrey ; Transport d'espèces ; UDS pour les 46 classes de tailles ; UDF/UDM**

Conditions entrée

50%(mol) CH₄ ; 50% Ar

3.73 NL/min CH₄

Re_D=740

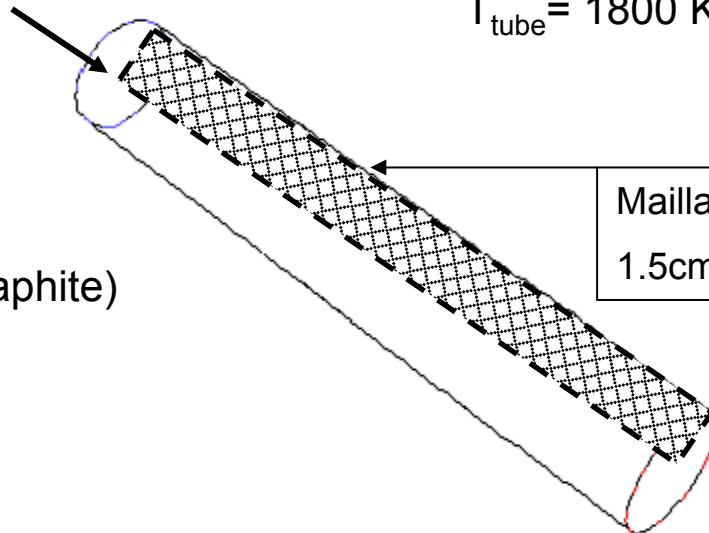
P=0,41b ; T=300K

D_{tube} = 3 cm (graphite)

L_{tube} = 60 cm

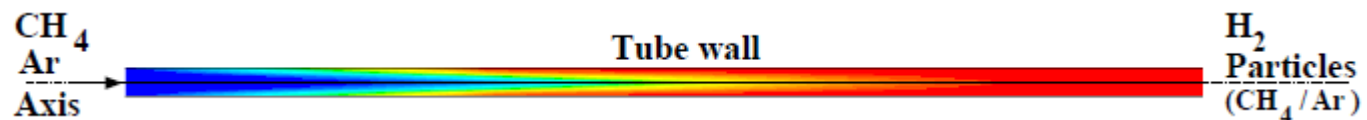
Température paroi imposée

T_{tube} = 1800 K, ε=0.9

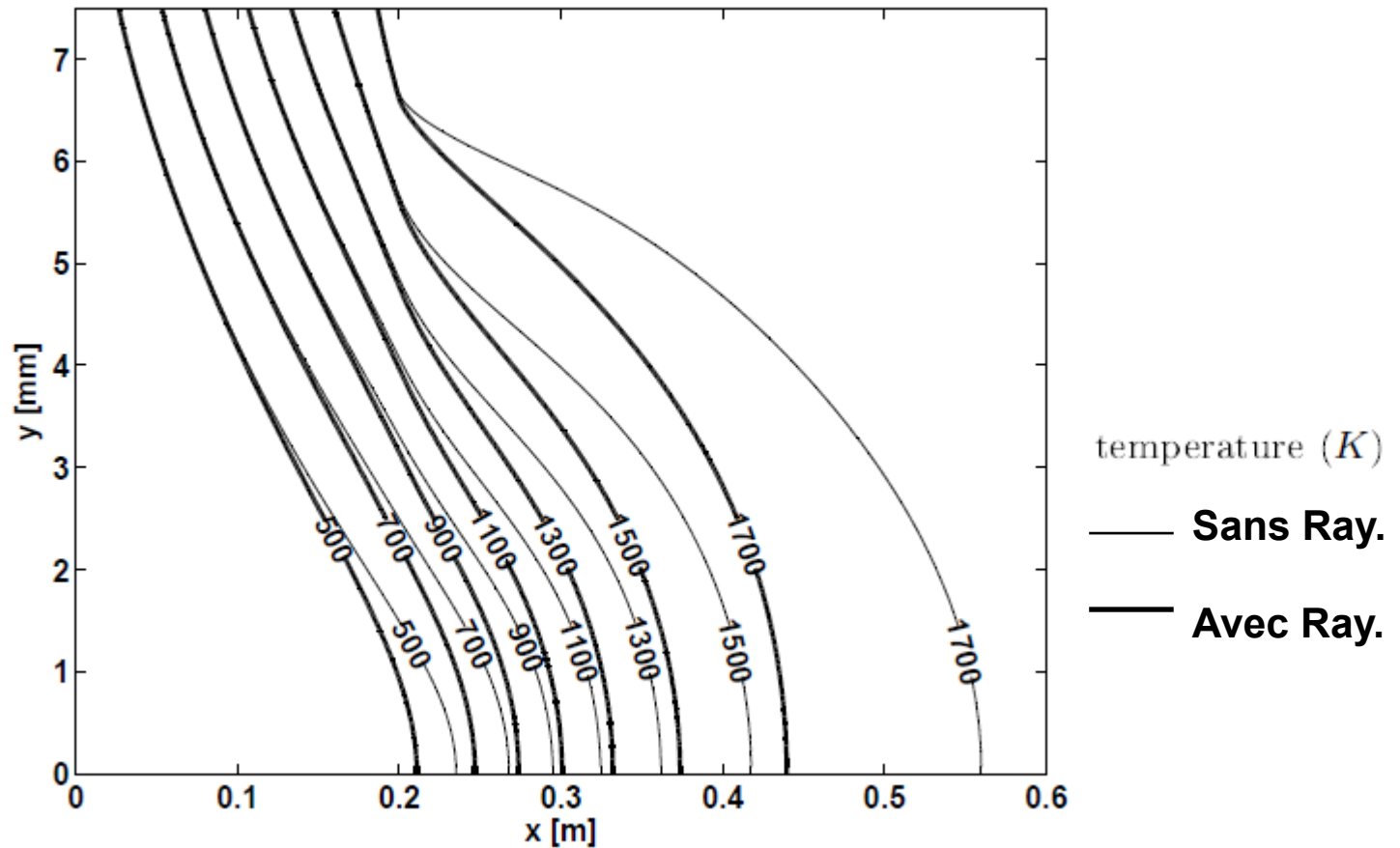
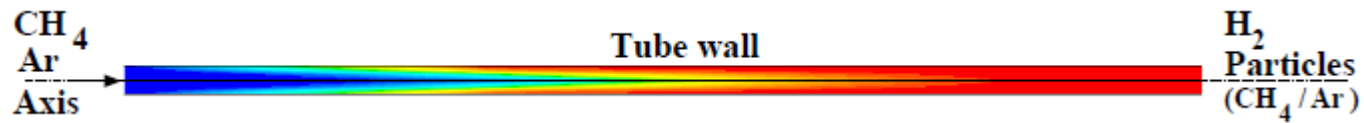


Maillage structuré 2d axi.

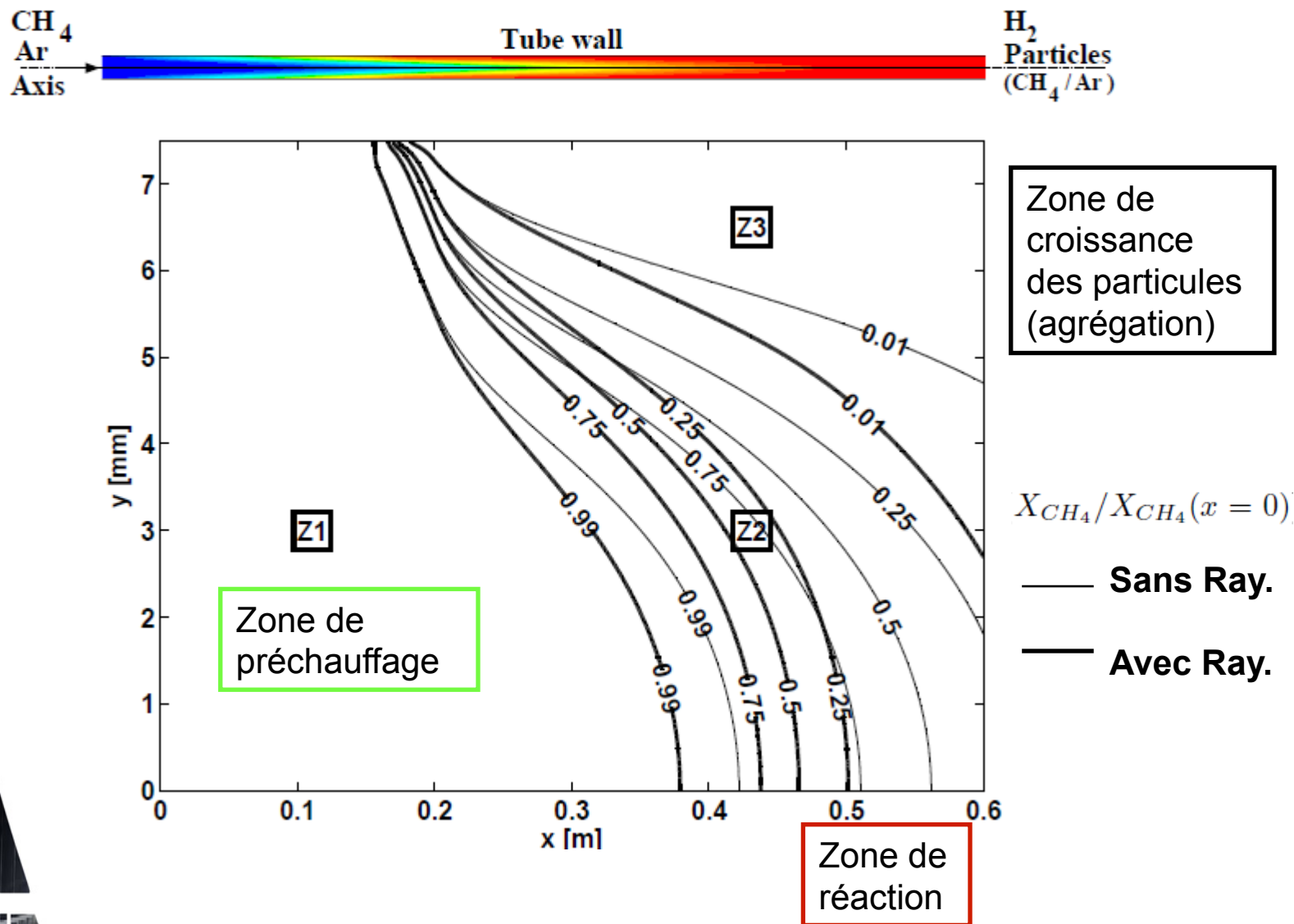
1.5cm*60cm => 130 000 cells



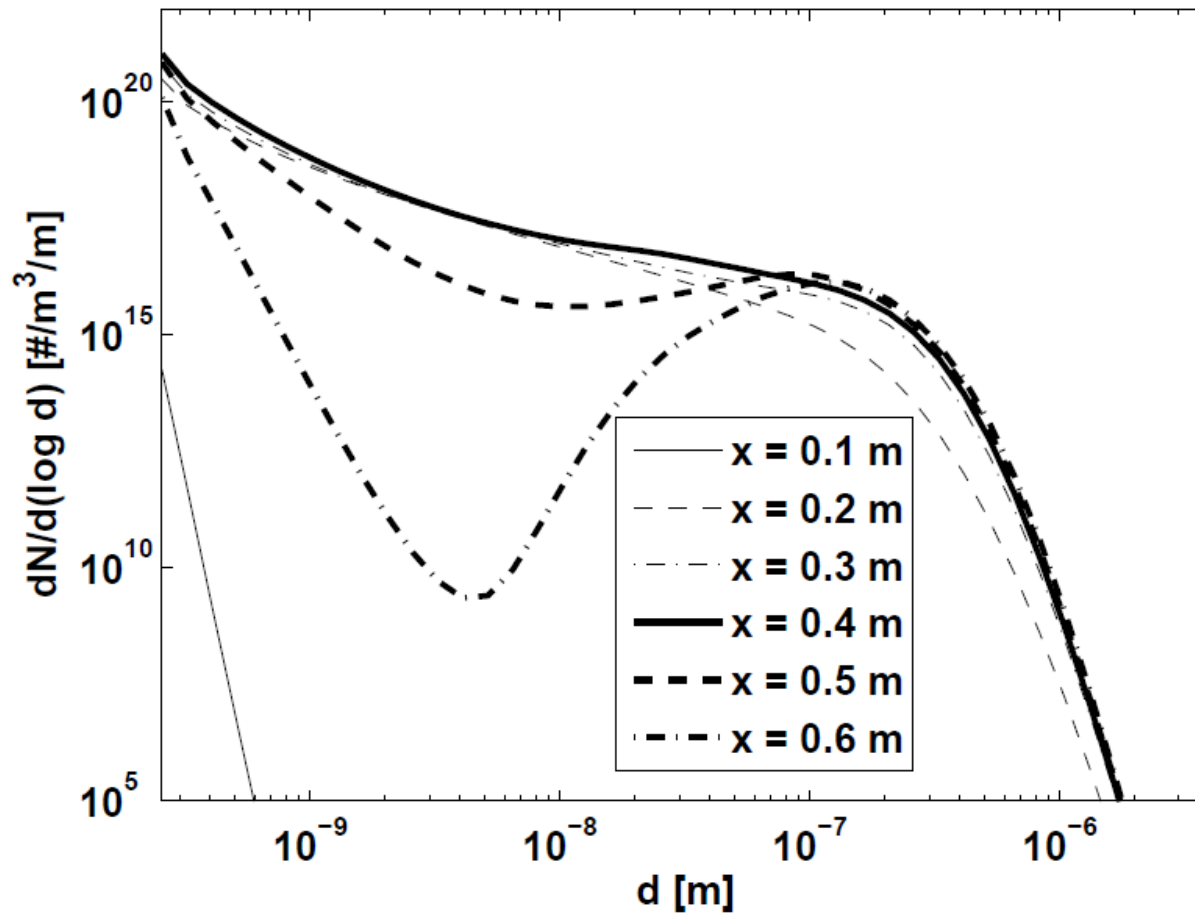
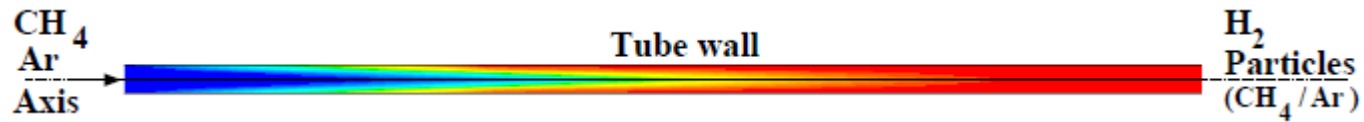
Effet du rayonnement sur la température



Effet du rayonnement sur la conversion du méthane



Granulométrie des particules dans le réacteur



Conclusion / Perspectives

- **Conclusion**
 - Développement du modèle
 - Les résultats montrent que :
 - L'absorption radiative favorise la réaction
 - Les granulométries de particules varient radialement et le long du réacteur ce qui justifie l'approche 2D.
- **Perspectives**
 - Amélioration du modèle (réaction paroi, dépôt,ensemenc.)
 - Validation expérimentale (granulo., convert.)
 - Etude de sensibilité
 - Conception d'un réacteur plus performant



Plan

- **Introduction**
- **Transferts couplés dans un réacteur solaire haute température de craquage de méthane (Solhycarb)**
- **Transferts couplés dans des récepteurs solaires volumiques haute température (Optisol)**



SIXTH FRAMEWORK
PROGRAMME



Récepteurs volumiques poreux à HT

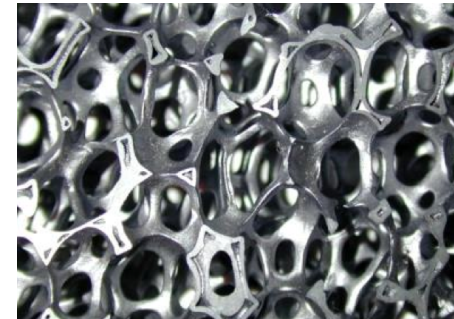
- Projet ANR SEED 2011
- partenaires :



- Objectifs :

$$\eta_{s \rightarrow t} > 85\% @ 1300 K$$

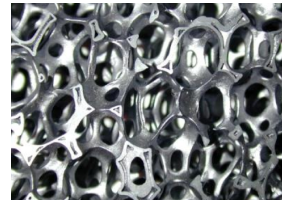
Rec. Vol. Patm en mousse de SiC



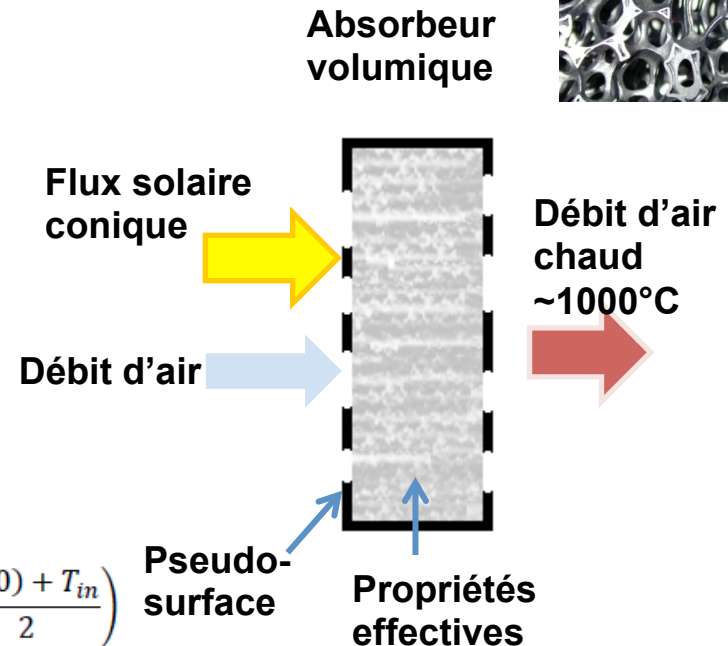
- Développement de modèles (validation exp.) d'absorbeurs :
 - à propriétés homogénéisées (milieux poreux effectif) pour les transferts couplés
 - à structures 3D pour l'étude des propriétés radiatives volumiques
- Optimisation numérique :
 - de la géométrie de la mousse (porosité, tailles de pores/brins)
 - des propriétés spectrales sélectives du matériau (TaC, ZrB₂, ZrC)
- Développement de procédés pour l'élaboration de mousses en α -SiC avec des dépôts sélectifs.

Modèle d'absorbeur volumique poreux 1D

- Géométrie 1D de mousses de SiC
- Hypothèse de milieu poreux équivalent avec des paramètres effectifs
- Mais prise en compte d'une pseudo-surface aux interfaces
- Milieu homogène, anisotherme et participant au rayonnement (gris)
- Equations couplés :
 - continuité, QdM, Energies pour le fluide et le solide, ETR



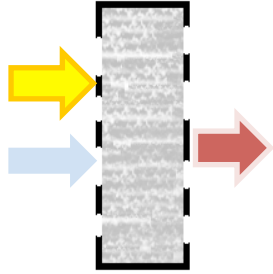
- Conditions limites entrée
 - Flux solaire incident conique
 - Débit d'air à T_{in}
- Conditions limites sortie
 - Flux thermique nul à la sortie
 - Paroi noire à $T_{f,out}$



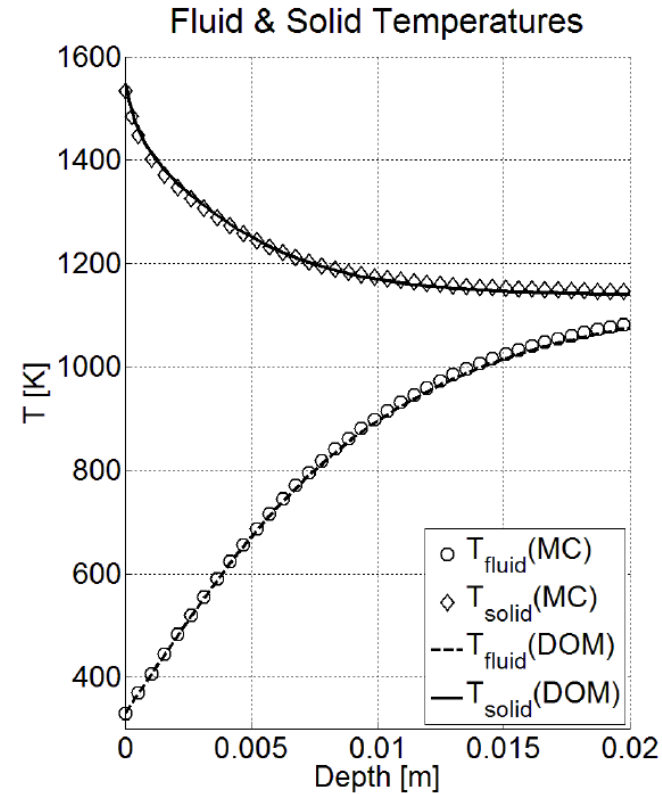
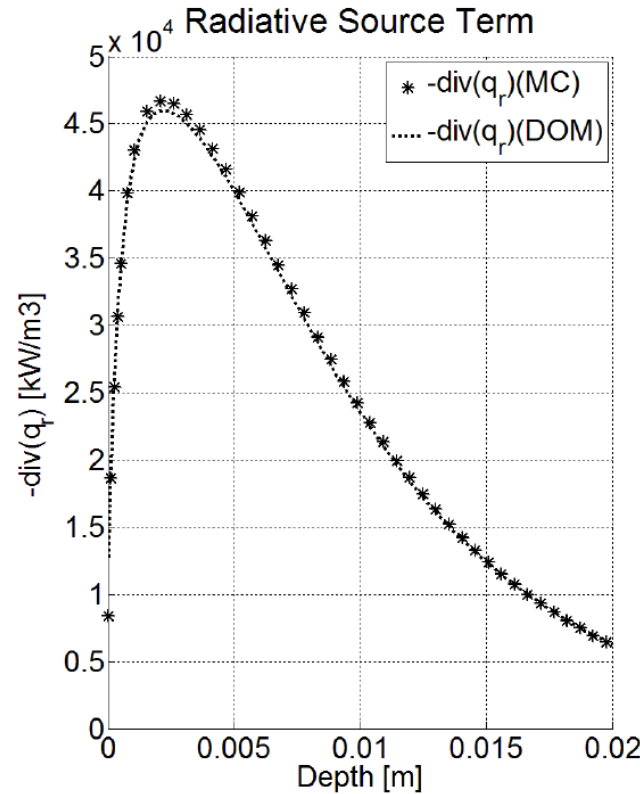
$$\alpha q_{in} = \alpha \sigma T_s^4(0) - k_s \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_0 + h_a \left(T_s(0) - \frac{T_f(0) + T_{in}}{2} \right)$$

$$\dot{m} C_p (T_f(0) - T_{in}) = (1 - \phi) h_a \left(T_s(0) - \frac{T_f(0) + T_{in}}{2} \right)$$

Simulation d'un absorbeur en mousse de SiC



Influence du modèle de transfert radiatif : MC vs. DO



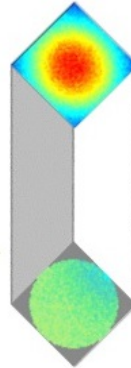
Absorptance	0.90
Absorption coefficient (m ⁻¹)	108
Scattering coefficient (m ⁻¹)	12
Phase function	diffuse sphere
Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.0
Mass flow per unit area (kg s ⁻¹ m ⁻²)	0.65
Porosity	0.90
Mean cell size (mm)	4
Incoming solar power (kW m ⁻²)	800

Le modèle DO permet d'atteindre une précision suffisante ($\Delta T_{\text{out}} = 8\text{K}$ et $\Delta \eta = 0,2\%$) et ~ 100 fois plus vite.

Banc de test au four solaire 6kW de PROMES

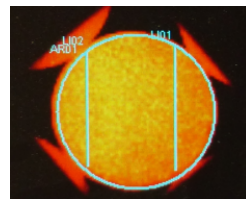
Banc de tests d'efficacité de conversion
d'absorbeurs volumiques solaires poreux

- $\theta_{1/2} = 30^\circ$
- Homogénéisateur ($Al+SiO$)
- Ech. 5cm diamètre
- Calorimétrie ($Cu+PTFE$)
- Fluxmétrie (distrib. surfacique)

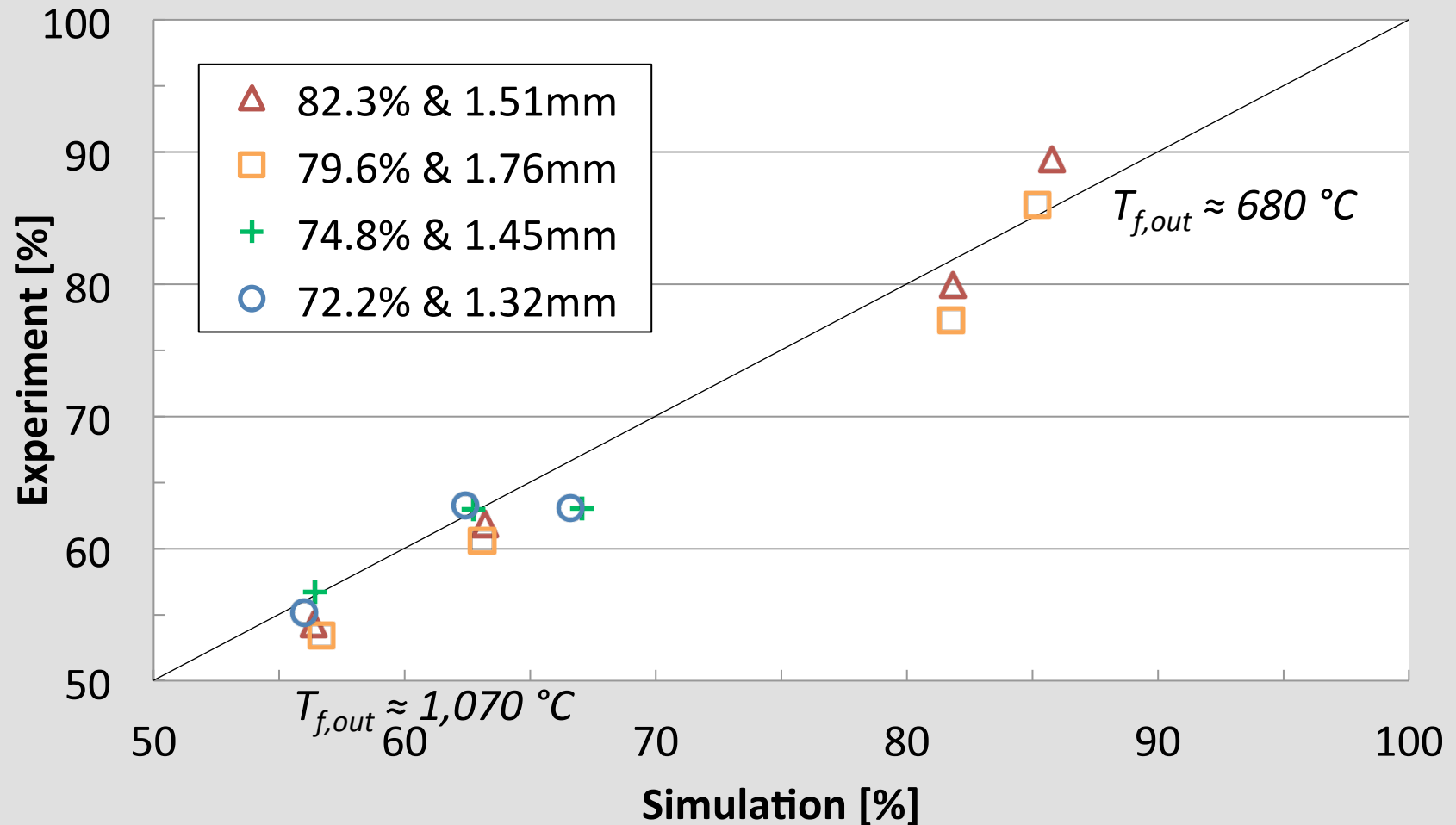


Mesures :

- Débit massique air (régulateur)
- Température du fluide entrée/sortie (thermocouples)
- Température solide entrée (IR-camera)
- Température solide sortie (thermoc.)
- Chute de pression (manomètre)
- DNI (pyranomètre)



Validation expérimentale



Travail en cours : optimisation numérique d'absorbeurs 1D sélectifs à gradients de propriétés géométriques



Merci pour votre attention

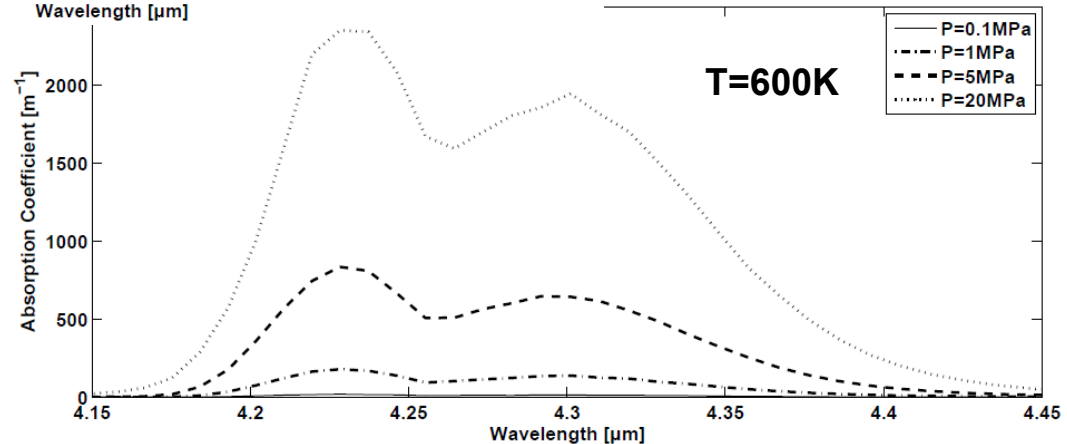
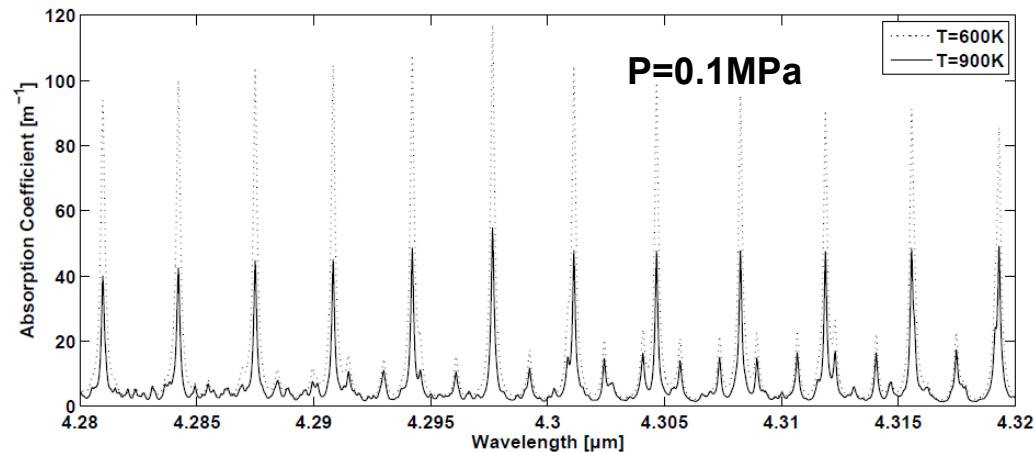
Echangeur tubulaire avec du CO₂ pressurisé comme fluide caloporteur

- Les cycles thermodynamiques utilisant du CO₂ supercritique (7.38 Mpa et 304.5K) peuvent être plus efficaces que les cycles He avec :
 - Une température entrée turbine plus basse : 550°C (s-CO₂) vs. 850°C (He)
 - Avec une pression d'entrée plus importante : 20 MPa (s-CO₂) vs. 8 MPa (He)
- Les transferts de chaleur dans un tube contenant du s-CO₂ ont été étudiés (corrélations pour h) mais l'effet des transferts radiatifs a été négligé.
- L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence des transferts radiatifs dans un tube chaud traversé par du CO₂ pur à différentes pressions.

Modèles de propriétés radiatives du CO₂

❑ Modèle Raie-par-Raie ($\Delta\nu=5.10^{-3}\text{cm}^{-1}$)

Base de données HITEMP 2010 et fonction χ (Perrin et al., JQSRT, 1989)



❑ Modèle de la fonction de distribution d'absorption
modèle ADF (10 groupes)

Simulation des transferts couplés

- Fluent : reg. stationnaire ; laminaire ; turbulent (Reynolds-Stress model) ; DO (4*4) multigrey ; UDF/UDM pour les propriétés thermo-physiques et radiatives.

Conditions entrée

100% CO₂

1m/s ; $Re_D = 2000 - 4.10^5$

P=1b-200b ; T=400K

Température paroi imposée

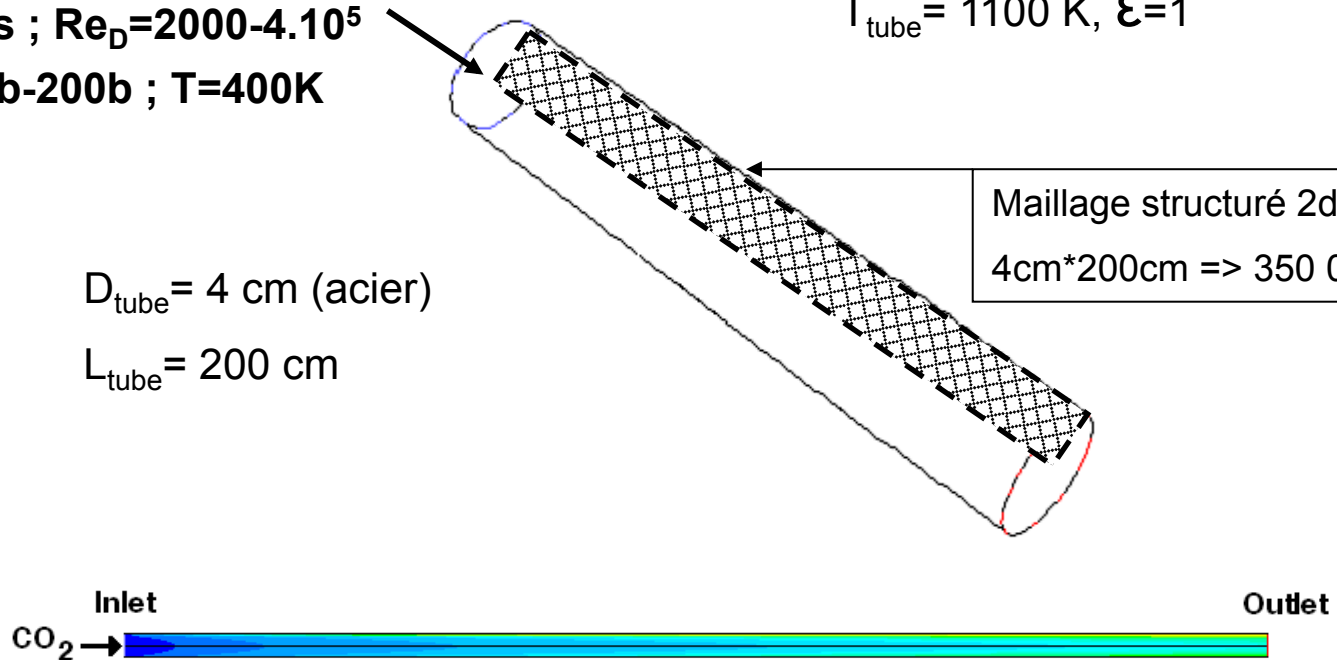
$T_{\text{tube}} = 1100 \text{ K}$, $\epsilon = 1$

$D_{\text{tube}} = 4 \text{ cm}$ (acier)

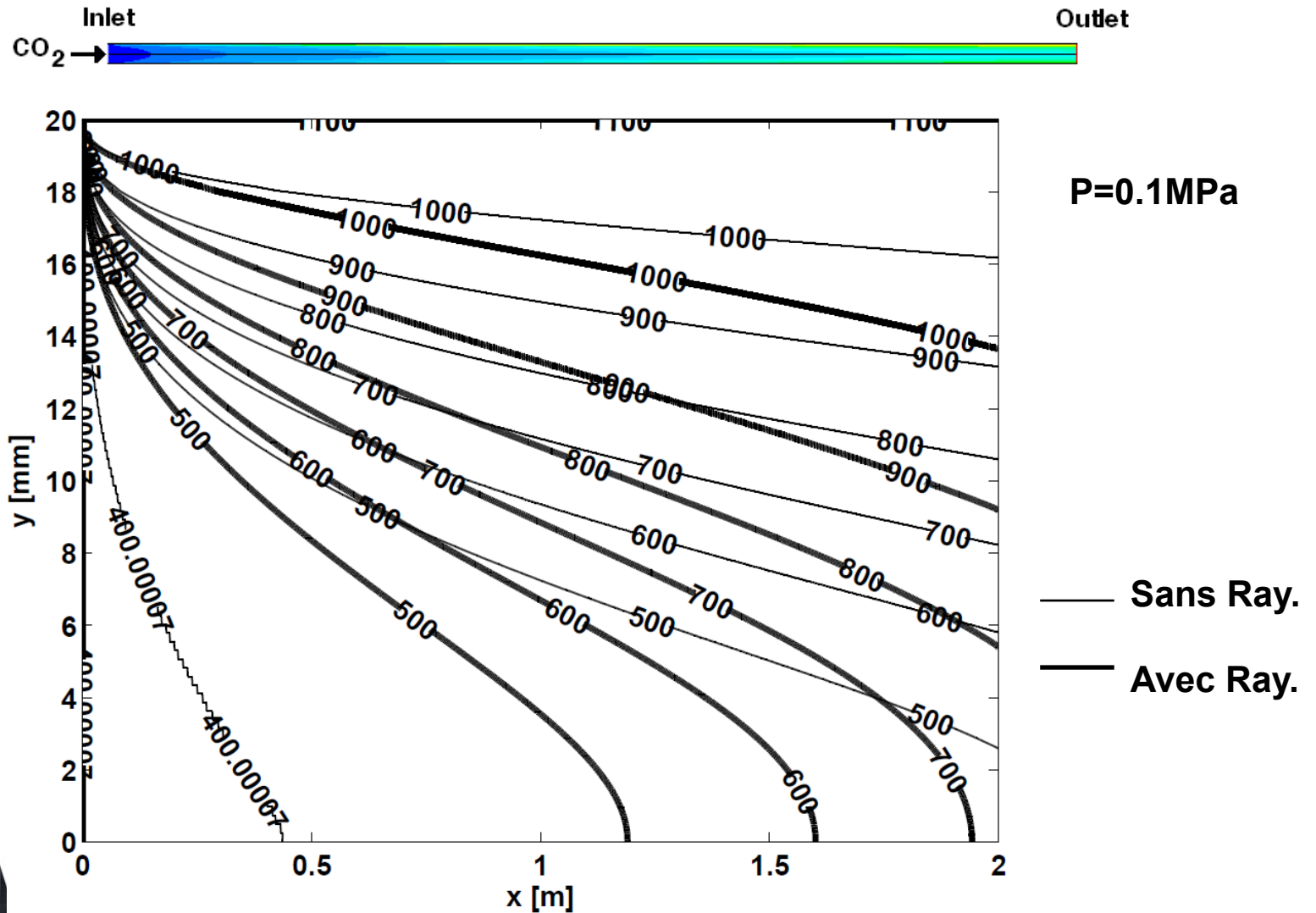
$L_{\text{tube}} = 200 \text{ cm}$

Maillage structuré 2d axi.

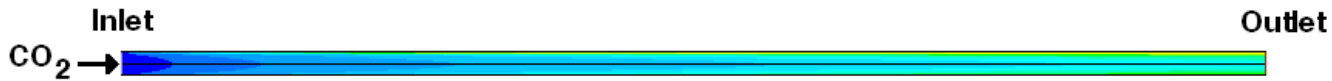
4cm*200cm => 350 000 cells



Effet du rayonnement sur la température, $P=0.1\text{MPa}$

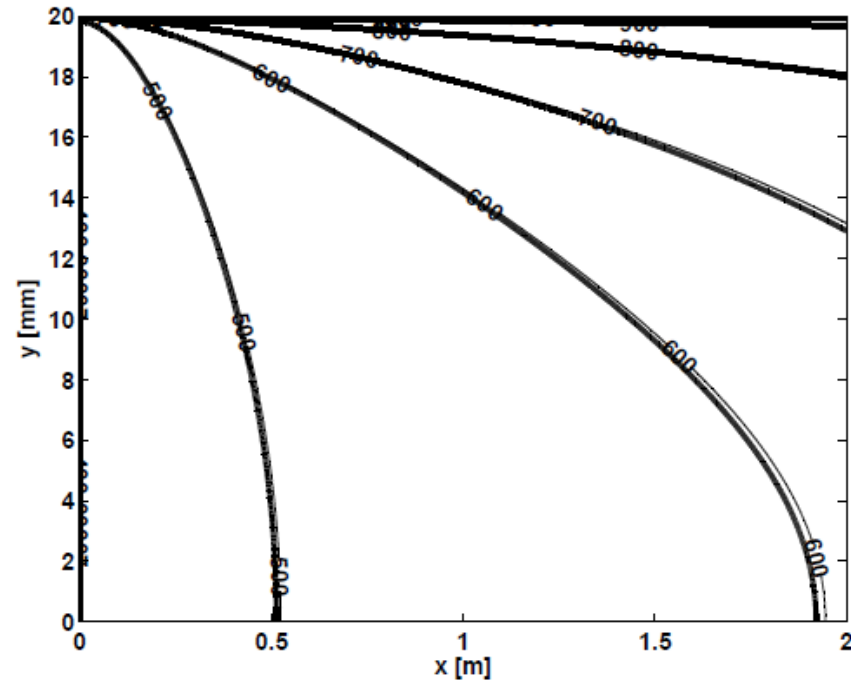
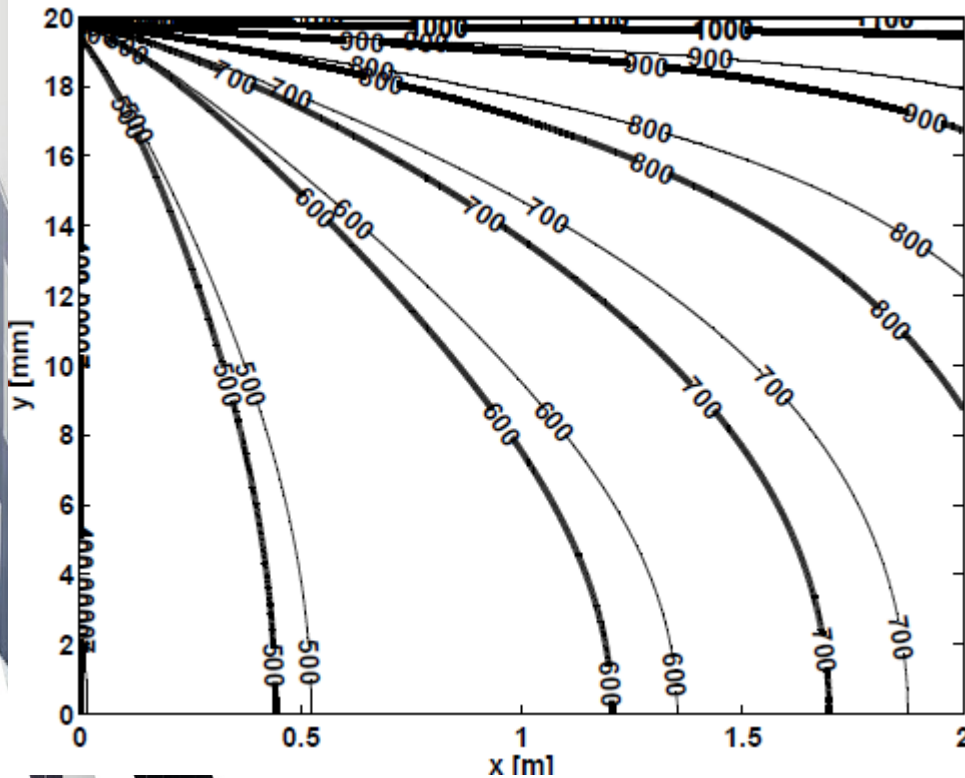


Effet du rayonnement sur la température



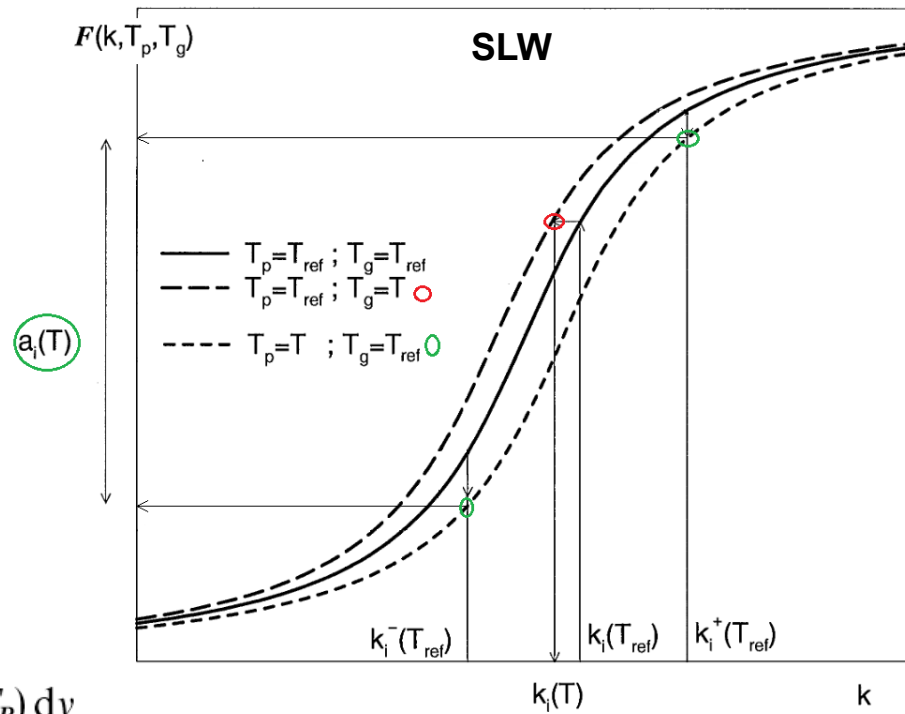
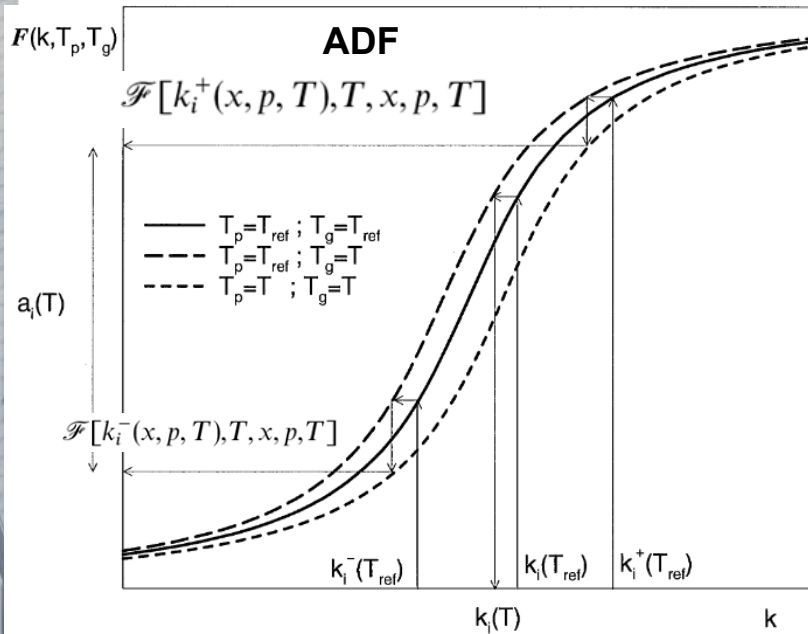
P = 1 MPa

P = 20 MPa



CCI : Forte influence de l'absorption radiative à faible pression (1-10b) puis négligeable au-delà de 100b.

Différence entre ADF et SLW



$$\mathcal{F}(k, T_p, x, p, T_g) = \frac{\pi}{\sigma T_p^4} \int_{v \text{ such that } k_v(x, p, T_g) \leq k} I_v^o(T_p) dv$$

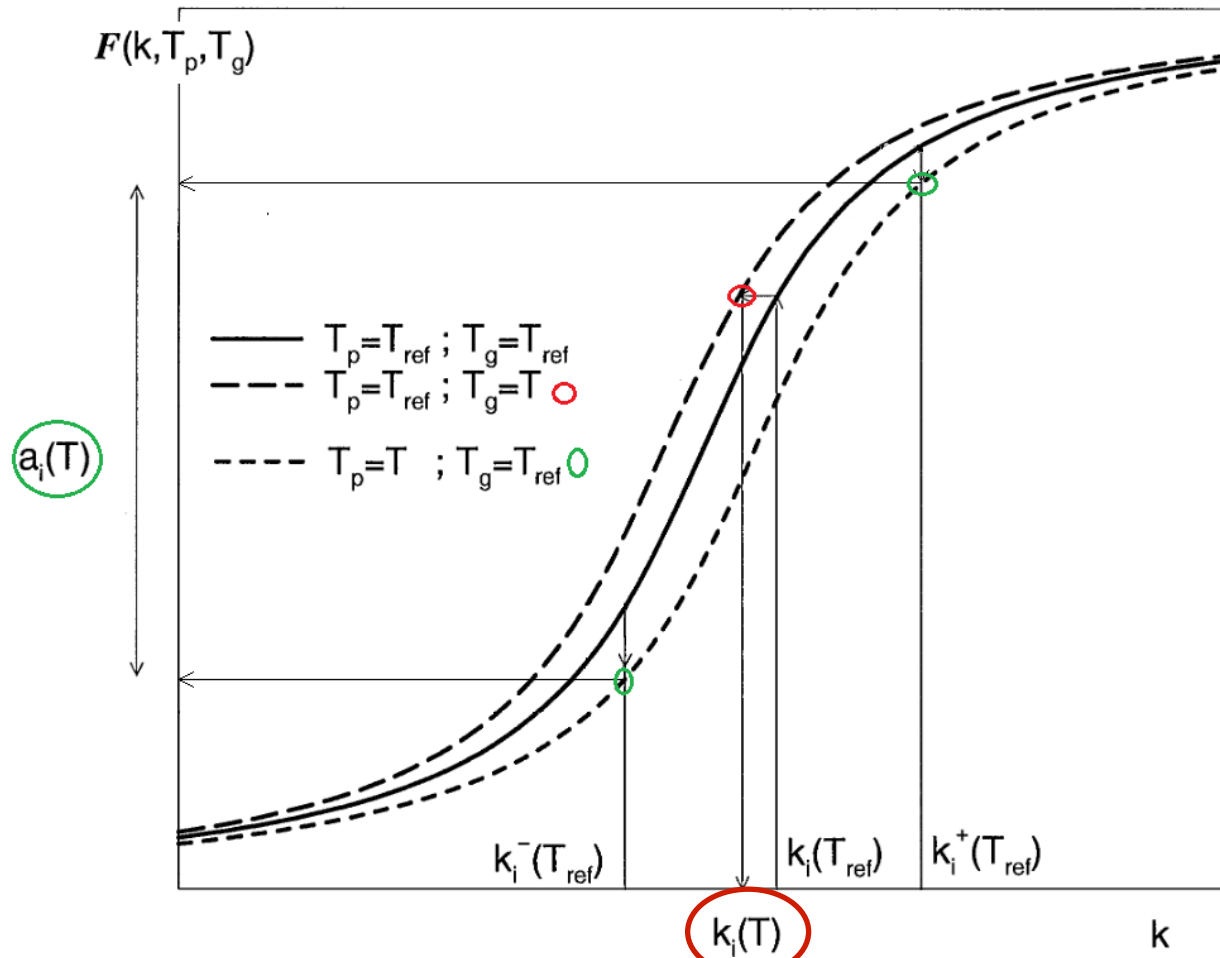
$$\mathcal{F}[k_i(x, p, T), T_{ref}, x, p, T] = \mathcal{F}[k_i(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T_{ref}, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}]$$

$$a_i(x, p, T) = \mathcal{F}[k_i^+(x, p, T), T, x, p, T] - \mathcal{F}[k_i^-(x, p, T), T, x, p, T] \quad \text{ADF}$$

$$a_i(T) = \mathcal{F}[k_i^+(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}] - \mathcal{F}[k_i^-(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}]$$

SLW

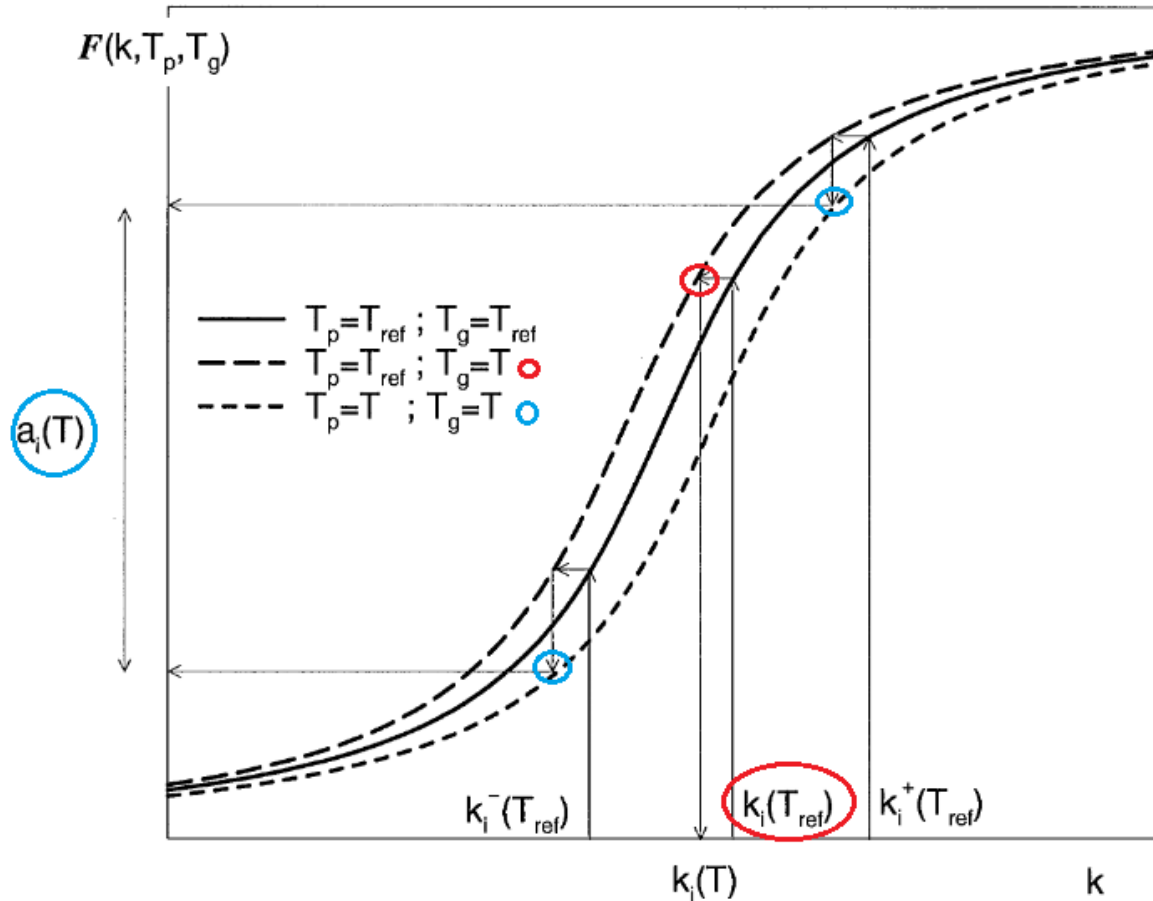
Principe du modèle spectral SLW



$$\mathcal{F}[k_i(x, p, T), T_{ref}, x, p, T] = \mathcal{F}[k_i(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T_{ref}, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}]$$

$$a_i(T) = \mathcal{F}[k_i^+(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}] - \mathcal{F}[k_i^-(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}]$$

Principe du modèle spectral ADF



Emissivité totale d'une colonne homogène isotherme

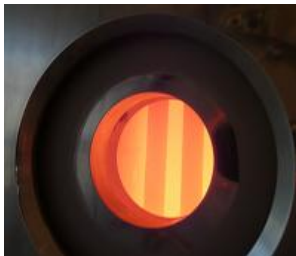
$$\mathcal{F}[k_i(x, p, T), T_{ref}, x, p, T] = \mathcal{F}[k_i(x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}), T_{ref}, x_{ref}, p_{ref}, T_{ref}]$$

$$a_i(x, p, T) = \mathcal{F}[k_i^+(x, p, T), T, x, p, T] - \mathcal{F}[k_i^-(x, p, T), T, x, p, T]$$

Introduction

- L'augmentation des rendements de conversions
 - thermodynamique et thermochimique
 - augmentent avec la température
 - mais les pertes radiatives aussi.

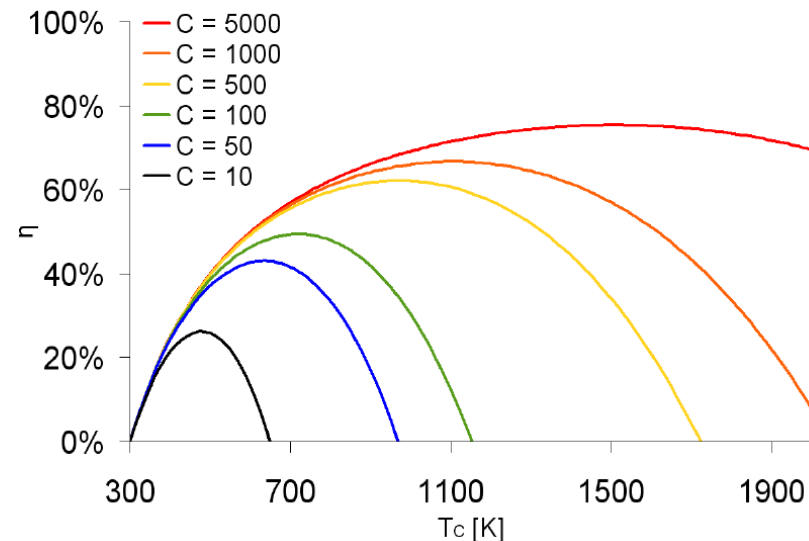
Rendement du récepteur ↓ Rendement de Carnot ↑



$$\eta = \left(1 - \frac{\sigma T_c^4}{IC}\right) \left(1 - \frac{T^0}{T_c}\right)$$

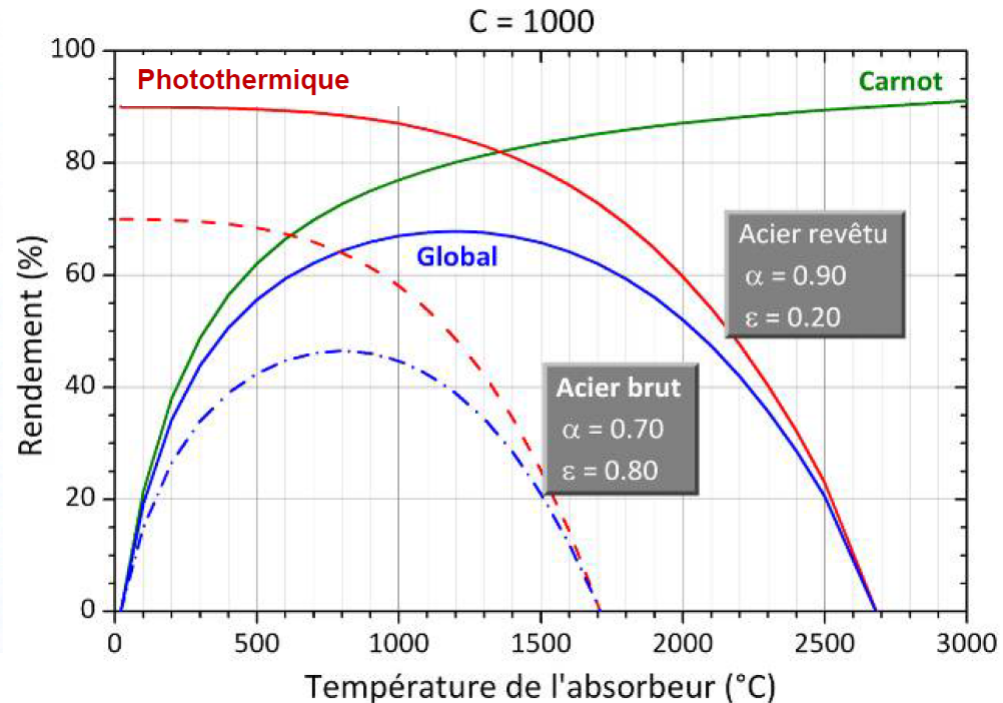
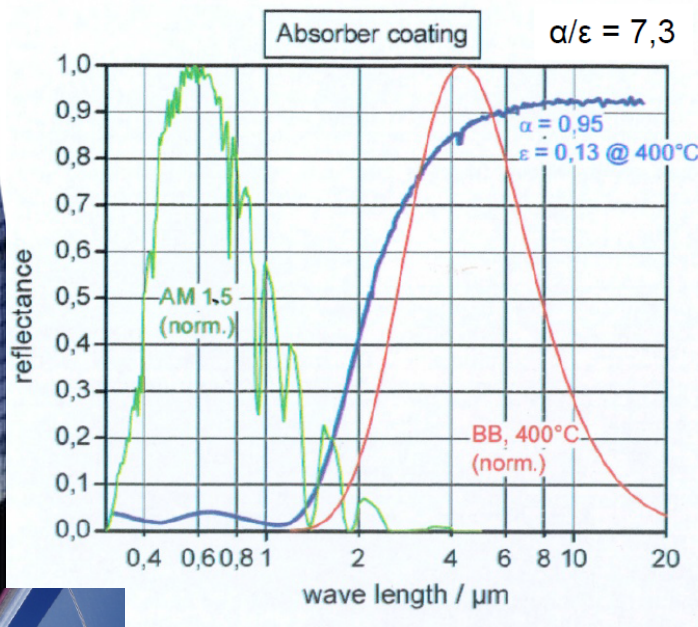
η : rendement exergetique
 T_c : température de la source chaude
 T^0 : température de l'environnement
 σ : constante de Stefan-Boltzmann
 C : concentration solaire
 I : flux solaire incident (1 kW/m²)

→ Pour un corps noir,
existence d'un optimum à T_c et
 C fixées



Introduction

- L'optimisation des récepteurs-réacteurs solaires à haute température nécessite
 - de minimiser les pertes radiatives (sélectivité spectrale)
 - de maximiser la conversion (optimisation therm., réact.)



Corps noir : $\alpha_s = \epsilon_{ir} = 1$
 corps sélectif parfait : $\alpha_s = 1, \epsilon_{ir} = 0$

Gain potentiel, 30% - 50%
 Par micro/nano-structuration
 ou couches minces