

Amélioration des propriétés radiatives des récepteurs solaires surfaciques haute température par microstructuration

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



Florent Larrouturou
Doctorant

Cyril Caliot
Chargé de Recherche
Cyril.Calio@promes.cnrs.fr

Gilles Flamant
Directeur de Recherche

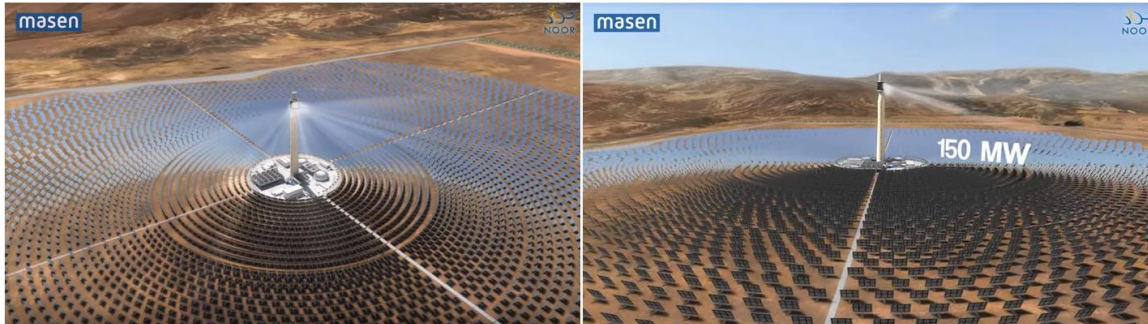
JERT 2015
Journées d'étude en
Rayonnement Thermique

26-27 novembre 2015,
ISAE-ENSMA, Poitiers



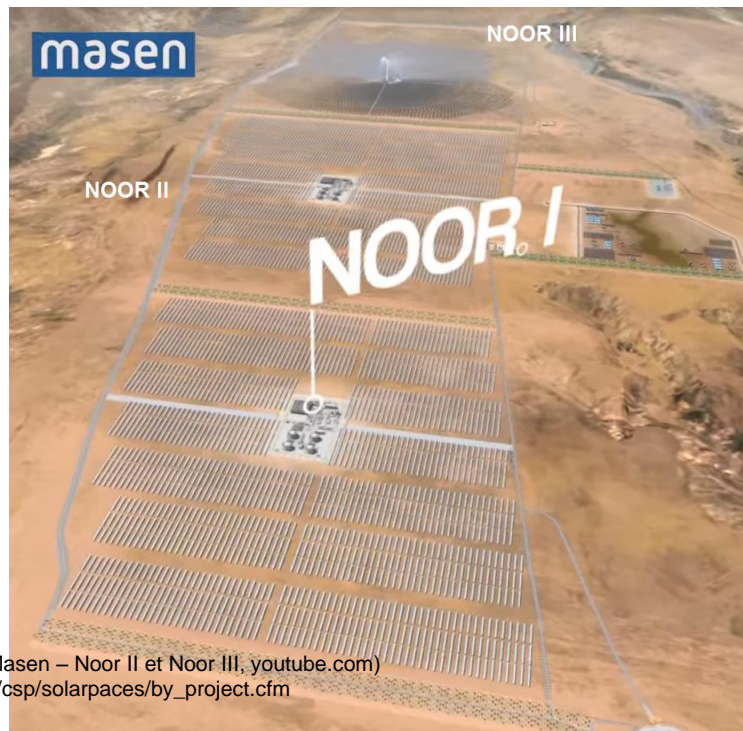
Projet NOOR

Ouarzazate, Maroc



NOOR 3 en construction (2015-2017):

- Tour (225 m)
- HTF sels fondus (290-565 °C)
- Stockage sels fondus 8h
- Turbine vapeur 150 MW
- 0.15 USD/kWh (13 c€/kWh)



NOOR 2 en construction (2015-2017):

- Cylindro-parabolique
- HTF huile thermique (293-393°C)
- Stockage sels fondus 7h
- Turbine vapeur 200 MW
- 0.14 USD/kWh

NOOR 1 (2015):

- Cylindro-parabolique
- HTF huile thermique (293-393°C)
- Stockage sels fondus 3h
- Turbine vapeur 160 MW
- Investissement 1.042 milliards €
- 0.189 USD/kWh

Images : Moondar Casablanca (Masen – Noor II et Noor III, youtube.com)

Source data : http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_project.cfm



Fonctionnement de centrale à tour

RECUPERATION

$$\eta_{rec}$$

Récepteur

MELTEN SALT SOLAR RECEIVER



HOT SALT TEMPERATURE 565°C

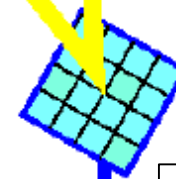
HOT SALT STORAGE TANK

COLD SALT STORAGE TANK

STEAM GENERATOR

TURBINE

COOLING TOWER



$$\eta_{hel}$$

CONCENTRATION

Champs d'héliostats

TRANSFORMATION

$$\eta_{thermo} \quad \eta_{gen}$$

Cycle thermodynamique, alternateur

Images : Sener



Solutions d'amélioration

Concentration

Champs d'héliostats

Optimiser la disposition du champ
Améliorer l'optique des héliostats
Augmenter la réflectivité
Augmenter la durabilité des héliostats
Standardiser le champ

Rendements

η_{hel}

Récupération

Récepteur

Optimiser les propriétés radiatives
Augmenter la durabilité des matériaux
Améliorer le fluide caloporteur
Augmenter les échanges thermiques

η_{rec}

Stockage

Stockage direct du fluide caloporteur
Augmenter la température du stockage
Thermocline

Transformation

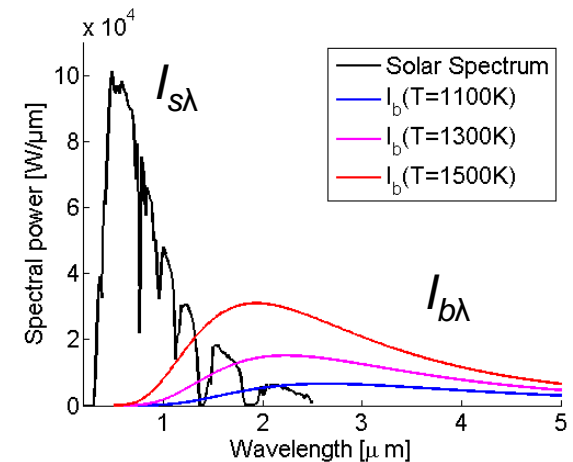
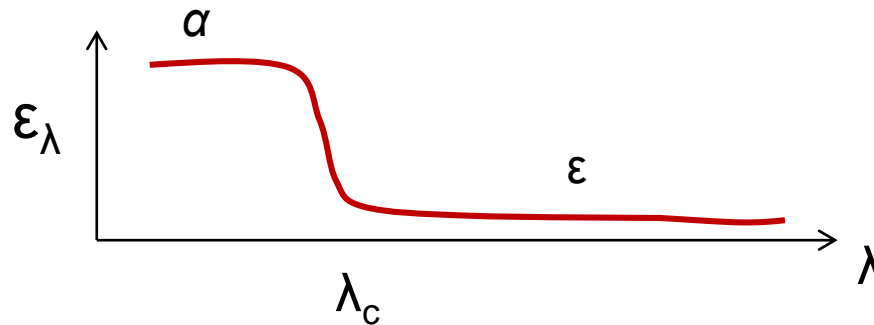
Augmenter la température
Améliorer l'hybridation
Standardiser

η_{thermo}

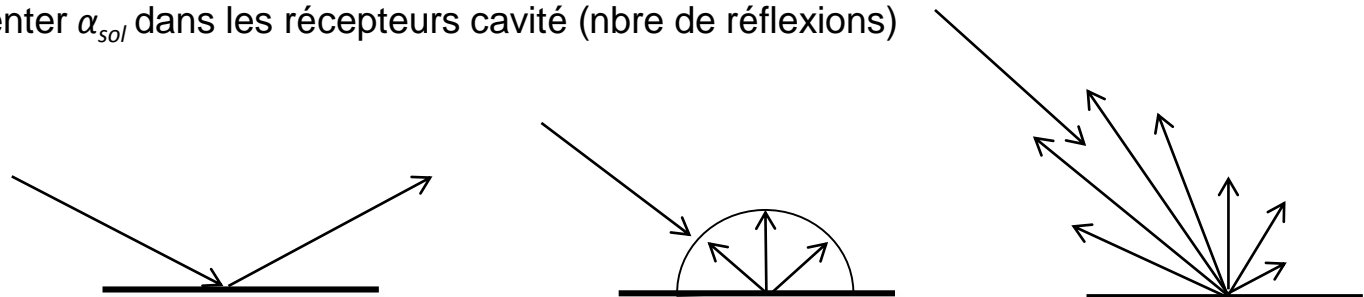
η_{gen}

Propriétés radiatives sélectivités

- La **sélectivité spectrale** idéale permet une absorption maximale du flux solaire et une émission infrarouge minimale



- La **sélectivité directionnelle** caractérise la dépendance angulaire du flux réfléchi
=> Augmenter α_{sol} dans les récepteurs cavité (nbre de réflexions)





Objectif et démarche

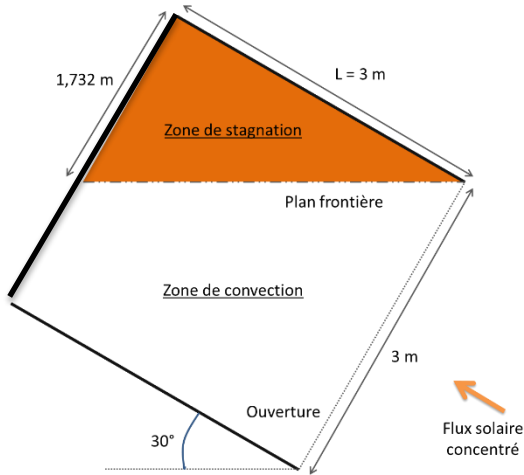
Objectif

- Augmenter le rendement de récepteurs solaires à haute température
- Quantifier l'influence des propriétés radiatives sur les rendements de centrale
- Améliorer les propriétés radiatives des récepteurs

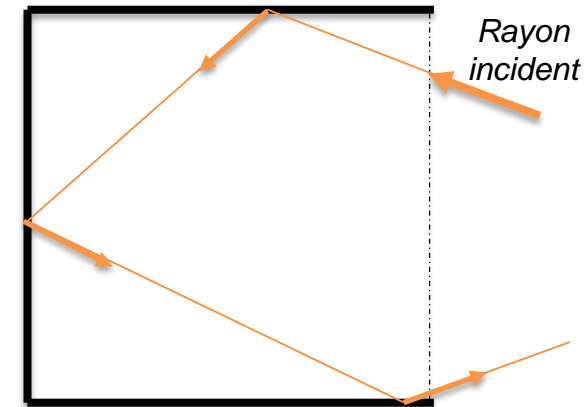
Démarche

1. Développer un modèle de récepteur haute température (et un modèle de centrale)
2. Réaliser une étude de sensibilité avec les propriétés radiatives comme paramètres
 - Sélectivité spectrale
3. Etudier l'influence de la microstructure sur les propriétés radiatives

Modèle de récepteur



$$\eta_{\text{rec}} = 1 - \frac{P_{\text{ref}} + P_{\text{em}} + P_{\text{conv}}}{P_{\text{inc}}}$$



Hypothèses

- Parois isothermes, opaques
- Milieu non participant
- Optique géométrique
- Absence de vent
- Absence de conduction/convection en face arrière

Paramètres

- Géométrie (plan/cavité)
- Propriétés radiatives spectrales
- Température des parois

P_{ref} et P_{em} sont calculés par des simulations Monte-Carlo (cavité)

$$P_{\text{conv}} = h S (T_w - 300\text{K})$$

Pertes par convection du récepteur cavité, $S=36\text{m}^2$:

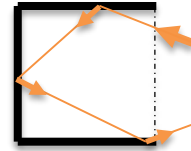
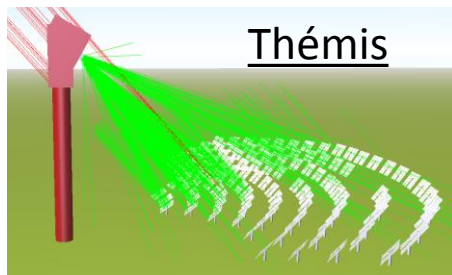
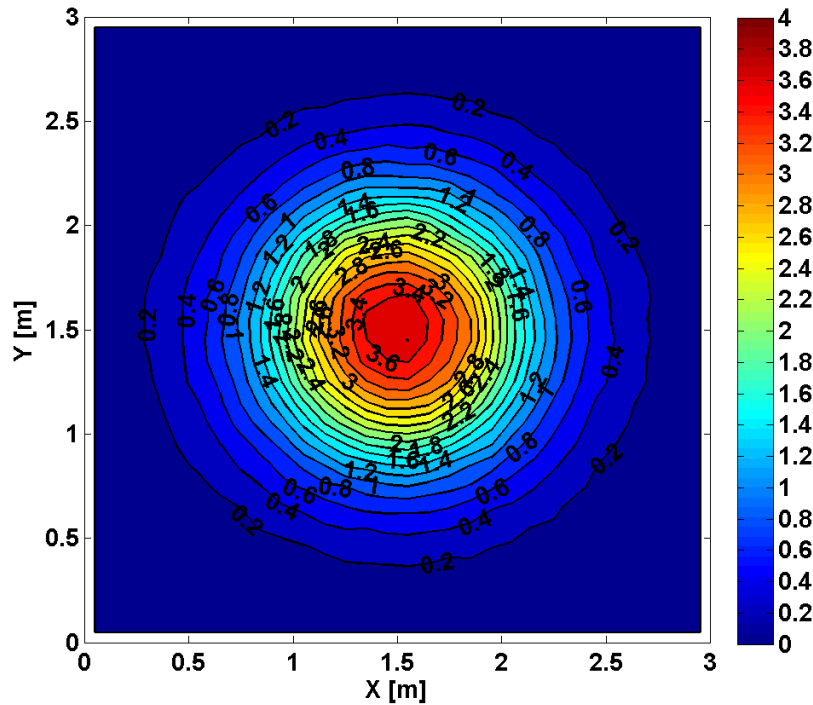
- Modèle de Clausing : $h = 7.3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
(CFD : $h = 6.4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; Paitoonsurikarn : $h = 6.8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

Pertes par convection du récepteur plan ($Ra \sim 5.10^{10}$) $S=9\text{m}^2$:

- Modèle de Churchill and Chu : $h = 5.8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Modèle de récepteur

Flux incident C=580



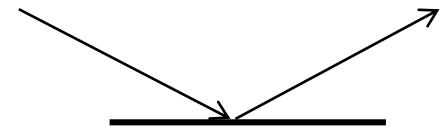
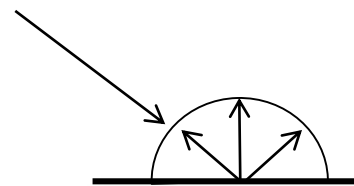
BRDF


$$f_r(p, \lambda, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(p, \lambda, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)}{dE(\lambda, \vec{\omega}_i)}$$

$$f_r(p, \lambda, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = a_d f_{diff} + (1 - a_d) f_{spec}$$

$$f_{diff} = \frac{f_r'^n}{\pi}$$

$$f_{spec} = \frac{\delta(\vec{\omega}_r - \vec{\omega}_s)}{\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i} f_r'^n$$





Modèle de centrale

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{hel}} \eta_{\text{rec}} \eta_{\text{thermo}} \eta_{\text{gen}}$$

Rendement optique du champ d'héliostats $\eta_{\text{hel}} = 70 \%$

Rendement thermodynamique endoreversible

Rendement de Chambadal-Novikov

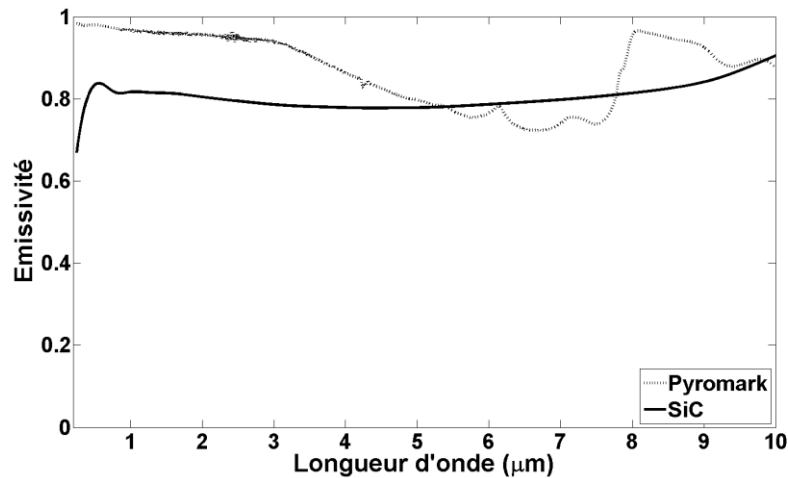
Prise en compte des irréversibilités lors des échanges avec l'extérieur

$$\eta_{\text{thermo}} = 1 - \sqrt{\frac{T_f}{T_c}} \qquad T_c = T_w - 150 \text{ K}$$

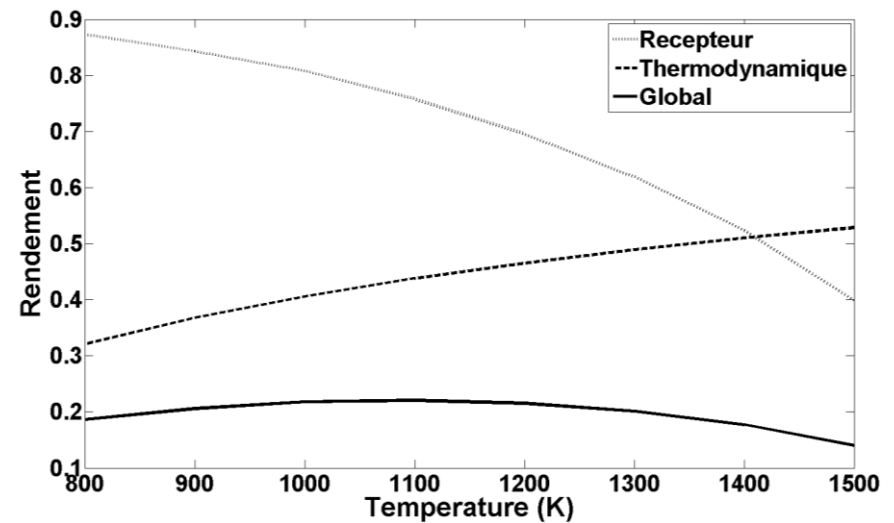
Rendement générateur $\eta_{\text{gen}} = 95 \%$

Récepteur HT de référence

Récepteur de référence en α -SiC
Parois diffuses ($\rho \sim 0.2$)



cavité : $\eta_{\text{rec}} ; \eta_{\text{thermo}} ; \eta_{\text{global}} = f(T_w)$



Cavité ($T=1100$ K) ; $\eta_{\text{ref}} = 22.8$ %

Plan ($T=1200$ K) ; $\eta_{\text{ref}} = 21.4$ %

Et. Param. : sélectivité spectrale

Rendement
du récepteur

ϵ_λ

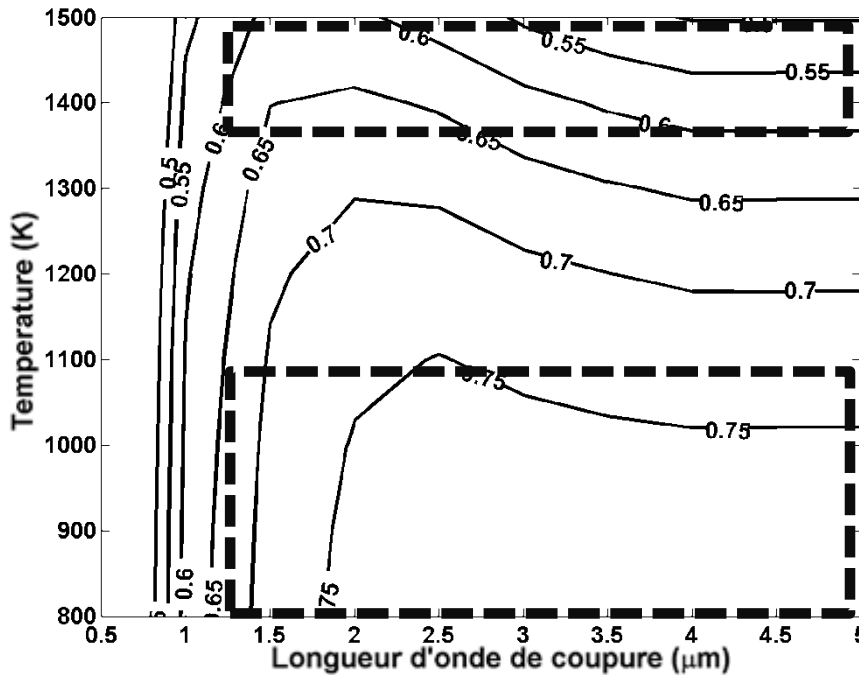
$\alpha = 0.8$

$\epsilon = 0.2$

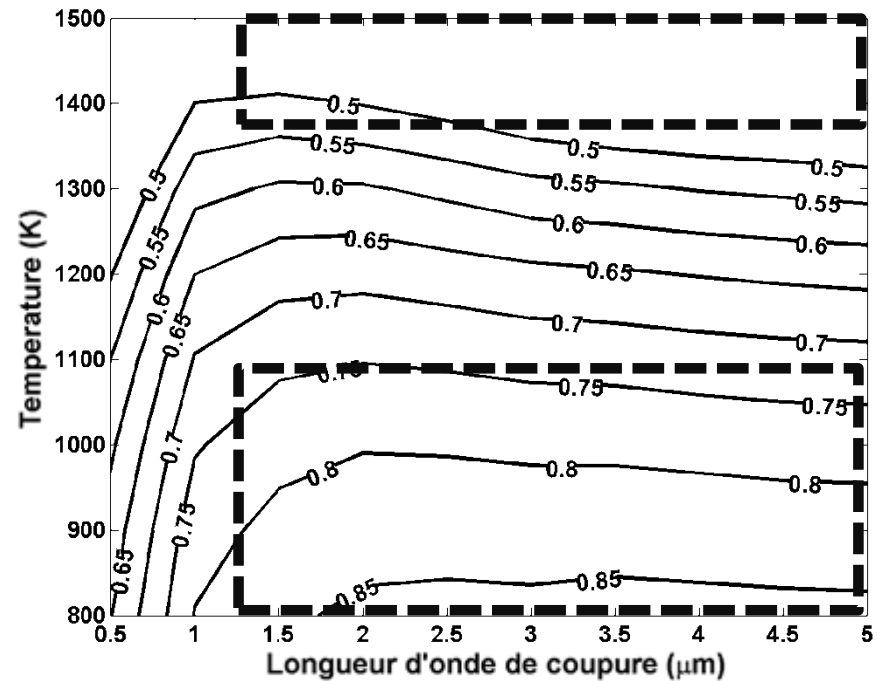
λ_c

λ

Plan ; C = 580

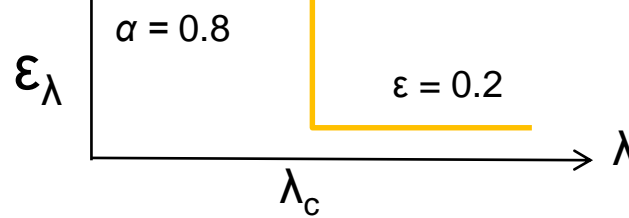


Cavité ; C = 580

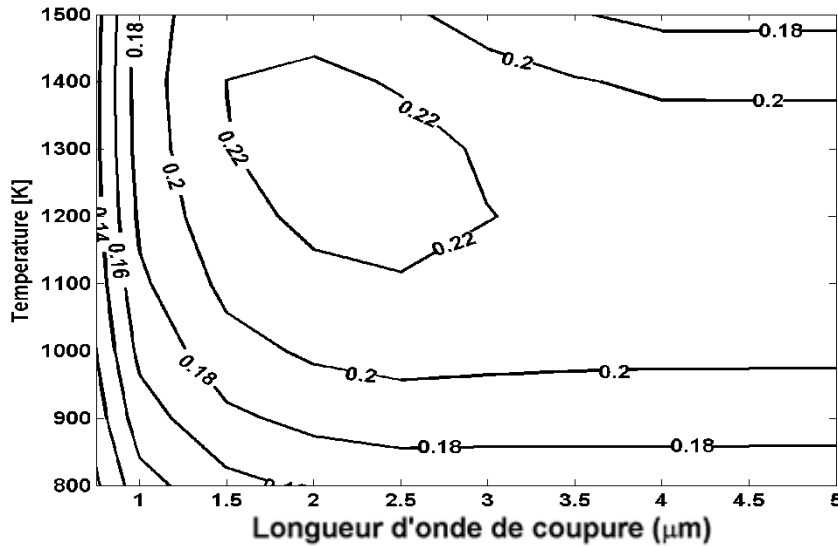


Et. Param. : sélectivité spectrale

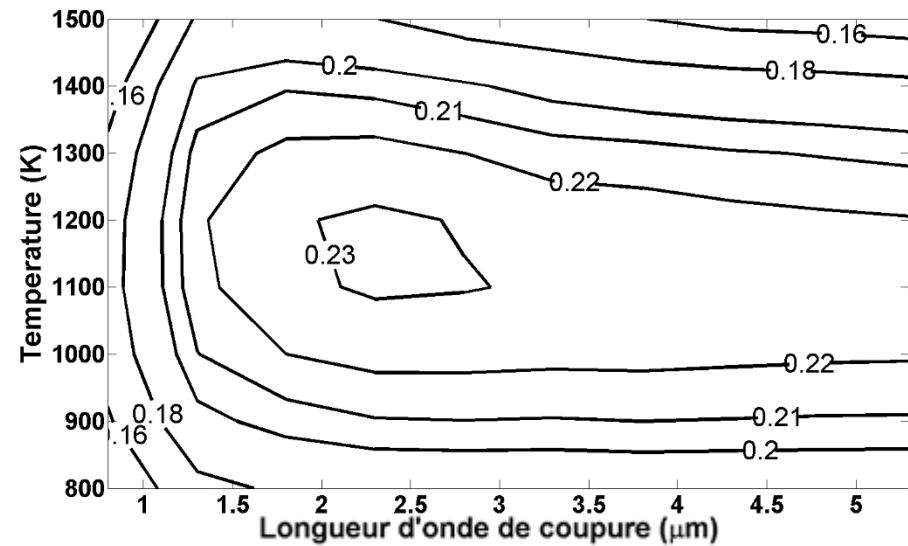
Rendement
de centrale




Plan ; C = 580



Cavité ; C = 580





Etude paramétrique Conclusion

Récepteur de référence (gris)

$$\alpha = \varepsilon = 0,8$$

Réfectivité diffuse ($a_d = 1$)

Récepteur corps noir

$$\alpha = \varepsilon = 1$$

Sélectivité spectrale ($a_d = 0,1$)

$$\alpha = 0,8 ; \varepsilon = 0,2 ; \lambda_c = 2 \mu\text{m}$$

Sélectivité spectrale idéale

$$\alpha = 1 ; \varepsilon = 0 ; \lambda_c = 2 \mu\text{m}$$

Plan

21.4 %

1100 K

26.9 %

1200 K

22.7 %

1300 K

29.2 %

1400 K

Cavité

22.8 %

1100 K

25.7 %

1200 K

23 %

1200 K

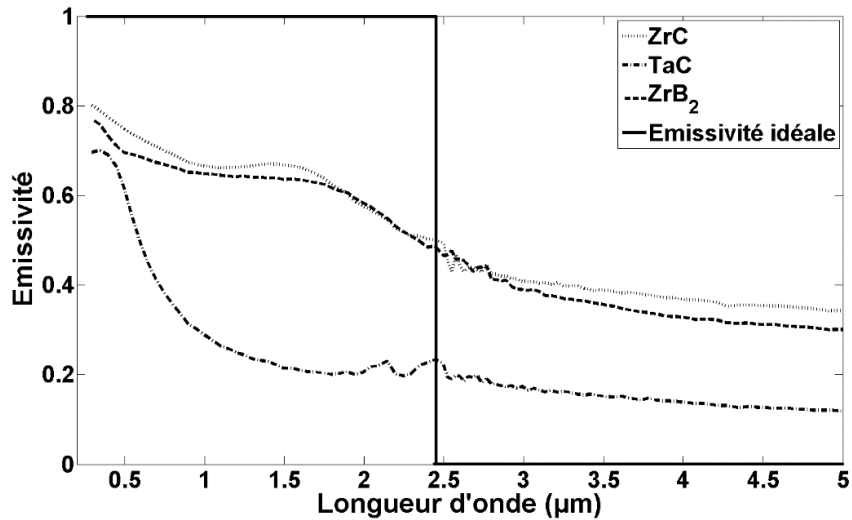
27.8 %

1300 K

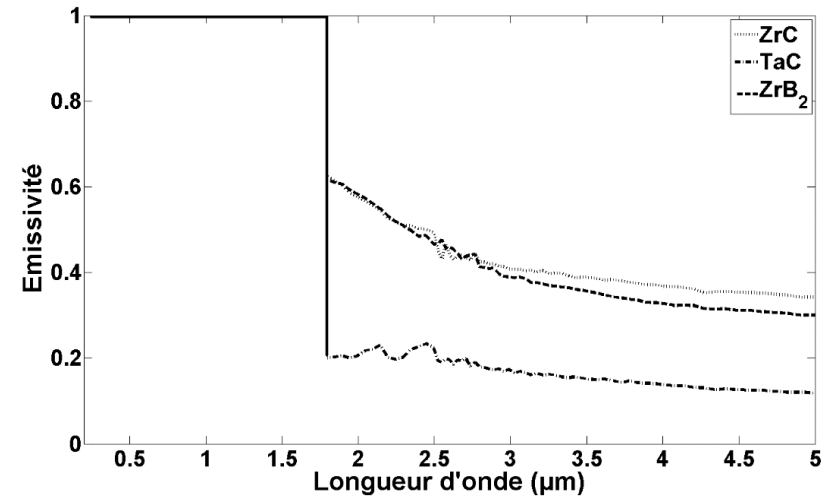
Utiliser la sélectivité spectrale naturelle de matériaux réfractaires

Maximiser α_{sol} par microstructuration de la surface

Matériaux et spécifications



Choix de **ZrC**, **ZrB₂**, **TaC**
pour leur tenue à haute
température sous air



Objectif : atteindre une
sélectivité quasi-idéale en
microstructurant la surface
du TaC

RCWA (GD-Calc)

Equations de Maxwell

$$\text{rot } \hat{\mathbf{E}} = -\mu \frac{\partial \hat{\mathbf{H}}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \hat{\mathbf{H}} = \varepsilon \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}}{\partial t} + \sigma \hat{\mathbf{E}}$$

$$\left[\begin{array}{l} E_y(x+p, z) = e^{ik_I p \sin \theta} E_y(x, z) \\ \text{Séparation des variables d'espace} \\ \text{Conditions de Floquet} \end{array} \right]$$

$$E_y^I = e^{i k_1 (x \sin \theta + z \cos \theta)} + \sum_{s=-\infty}^{+\infty} R_s e^{ik_{xs}x - ik_{1,zs}z}$$

Réfectivité directionnelle hémisphérique

$$\rho_\lambda'^n = \sum_{s=1}^{N_D} R_{\lambda,s}$$

Emissivité directionnelle

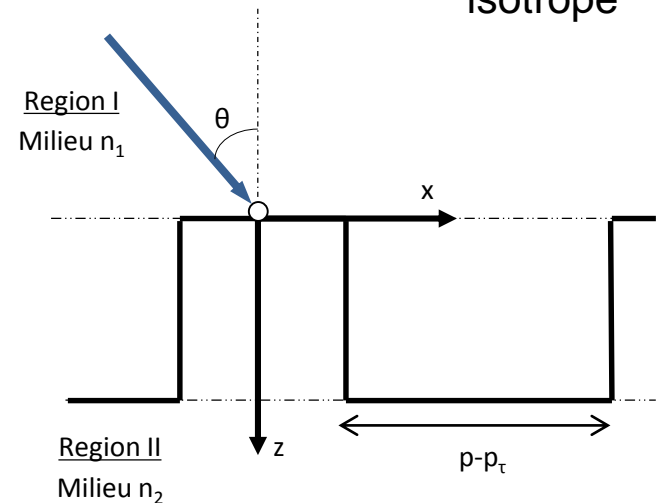
$$\epsilon'_\lambda = 1 - \rho_\lambda'^n$$

Hypothèses

Permittivité
périodique

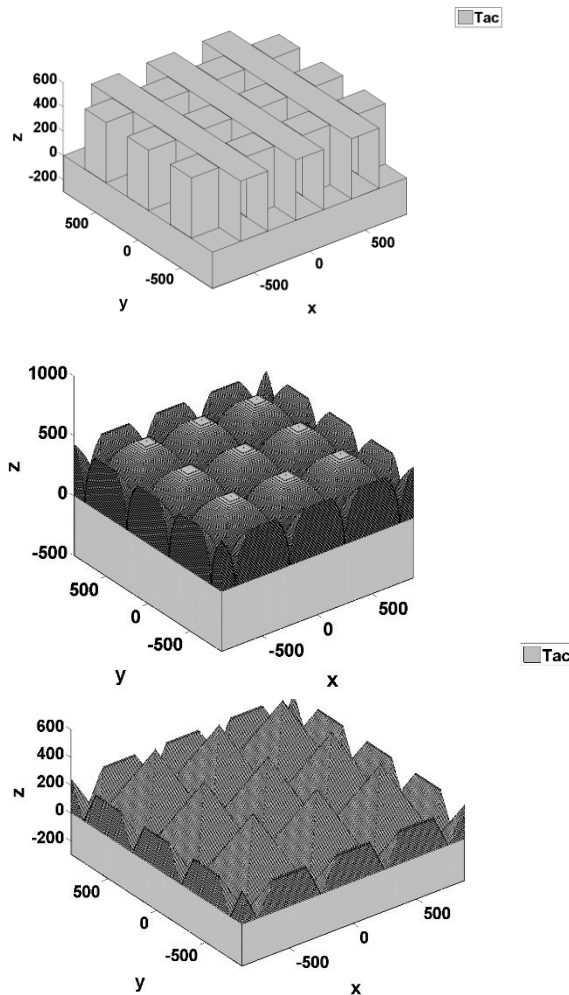
Continuité des
champs

Matériau linéaire
isotrope

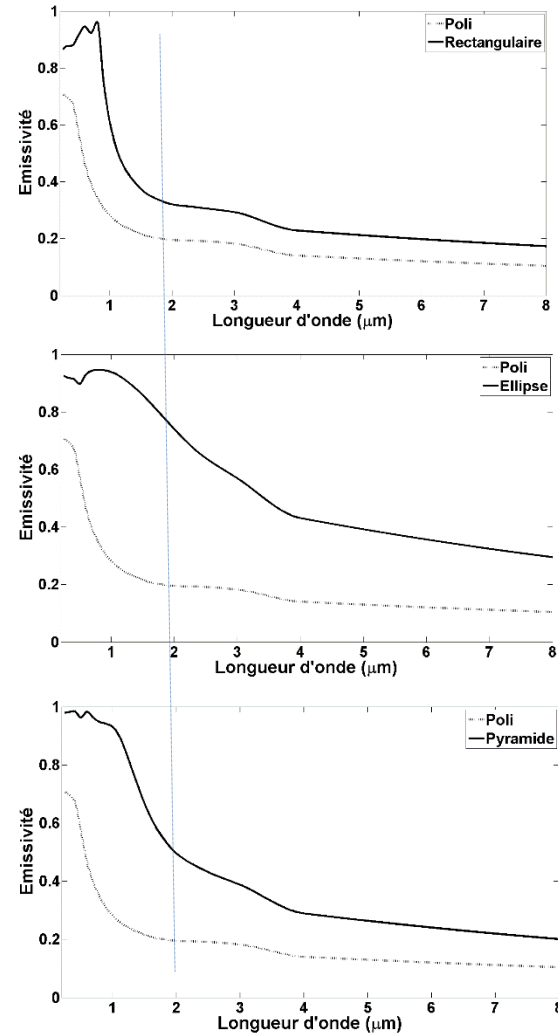


Microstructuration bipériodique

Forme $p = d = 500 \text{ nm}$



Emissivité normale



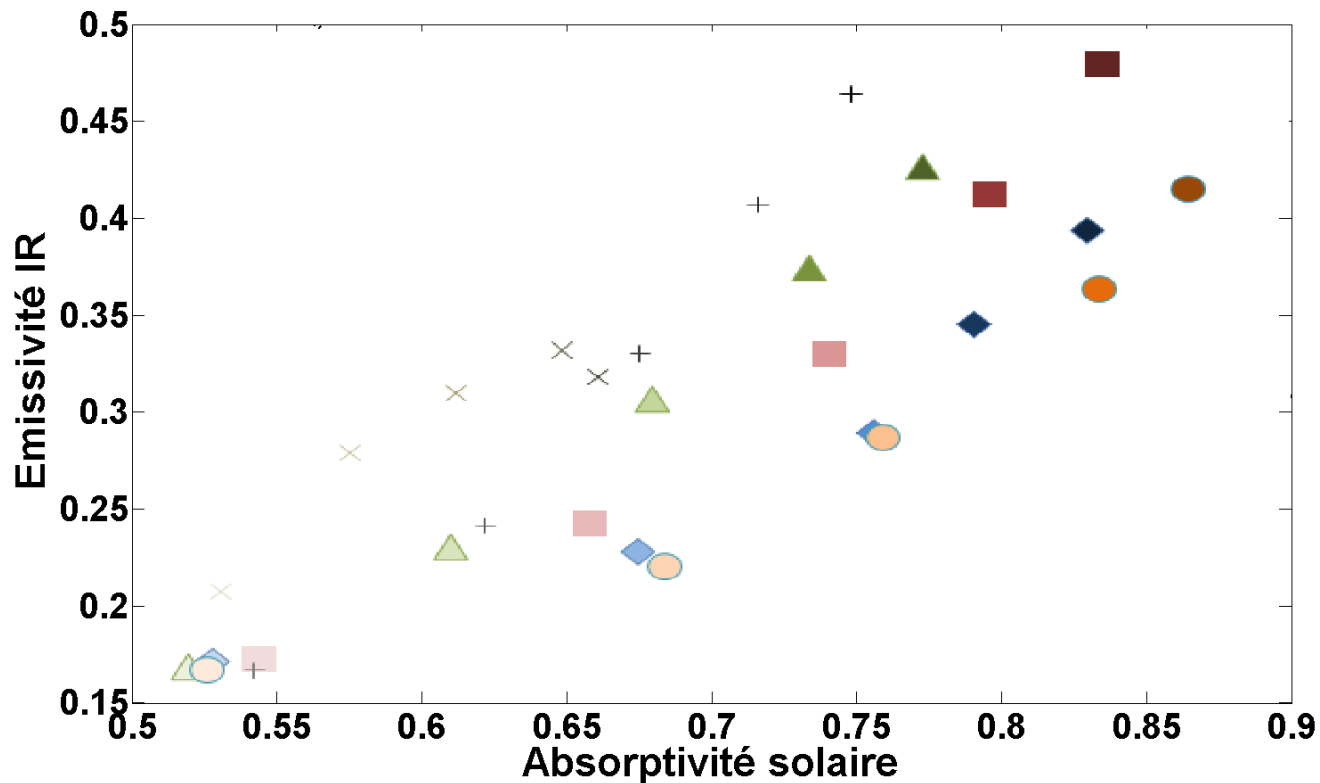
Microstructuration :

α_{sol} VS. ϵ_{IR}

$$\alpha_{sol} = \int \epsilon_{\lambda} I_{s\lambda} d\lambda / \int I_{s\lambda} d\lambda$$

$$\epsilon_{IR} = \int \epsilon_{\lambda} I_{b\lambda}(T) d\lambda / \int I_{b\lambda} d\lambda$$

Influence de la géométrie et des dimensions sur α_{sol} et ϵ_{IR}



α_{sol} et ϵ_{IR} pour différentes géométries et périodes

Hauteur fixée à 1000 nm. Périodes de 200 (points clairs) à 1000 nm (foncés)

Croix inclinée : rectangulaire ; croix inclinée : elliptique ; triangle : pyramide 0.3 ; carré : pyramide 0.5 ; rond : pyramide ; losange : pyramide 2



Conclusion et perspectives

Conclusions

Valeurs des **températures maximales** de parois de récepteurs solaires (fonctionnement sans hybridation) : **1200 K** pour une paroi noire

L'absorptivité solaire est le paramètre clé à maximiser.

Etude de **l'émissivité normale** de **microstructures bi-périodiques**

- forte influence de la **forme** (hauteur, période)
- relief **pyramidal**
- augmentation concomitante de α_{sol} et ϵ_{IR}

Perspectives

Tests de tenue en température sous air de matériaux HT (TaC, ZrC, ZrB₂, épaisseur d'oxyde)

Réalisation de microstructures et **mesure** de réflectivité spectrale

Calcul de **l'émissivité hémisphérique** de reliefs bi-périodiques

Merci de votre attention



MICROSTRUCTURES

Indices optiques

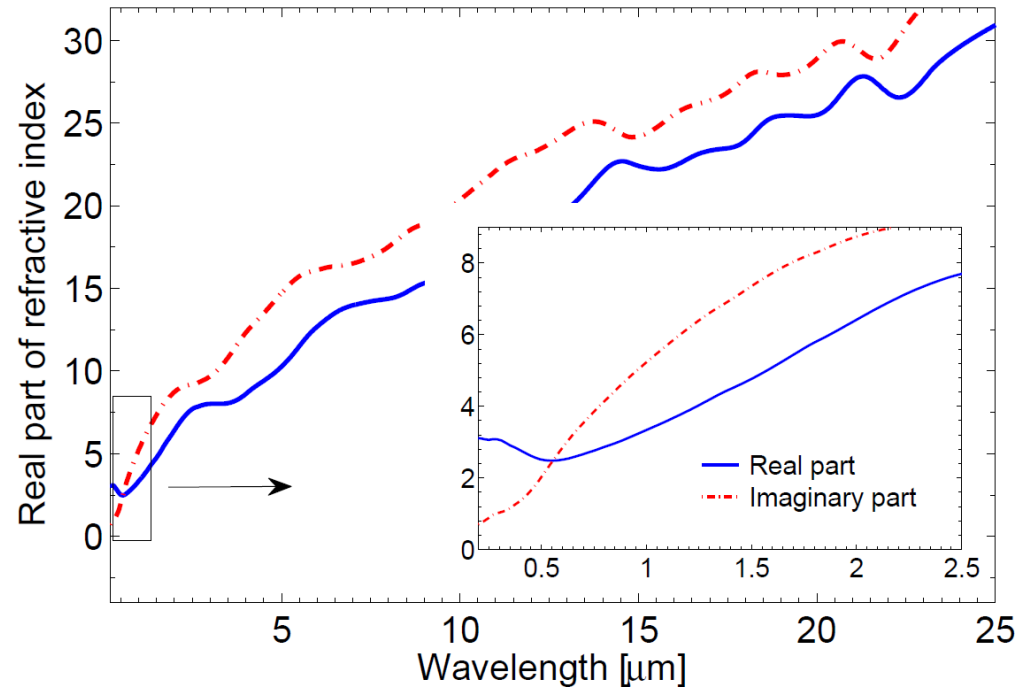
Indices optiques du TaC

1. Fabrication des échantillons
2. Mesure de la réflectivité
3. Calcul des indices de réfractons

Equations de Kramers-Kronig

$$n(\lambda) = \frac{1 - R(\lambda)}{1 + R(\lambda) - 2\sqrt{R(\lambda)} \cos \theta(\lambda)}$$

$$k(\lambda) = \frac{-2\sqrt{R(\lambda)} \sin \theta(\lambda)}{1 + R(\lambda) - 2\sqrt{R(\lambda)} \cos \theta(\lambda)}$$



Indices de réfraction du TaC

INTRODUCTION

Concentration

Concentration linéaire

Concentration ≈ 100
Température fluide $\approx 800-900$ K

Récepteur mobile



Cylindro-parabolique

Récepteur fixe



Fresnel

Concentration ponctuelle

Concentration > 1000
Température fluide > 1000 K



Dish



Tour