

Equilibre thermique d'un récepteur solaire et Fluides de transfert

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

Master ER&S
2015
Université
Mohammed V

**FLAMANT
Gilles**

Directeur
PROMES-CNRS

Gilles.flamant@promes.cnrs.fr



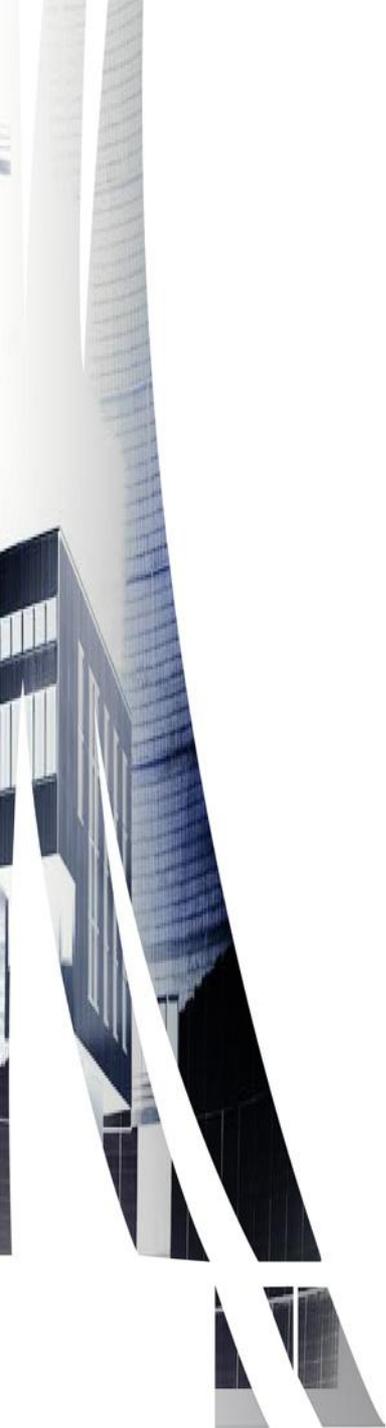
Sommaire

EQUILIBRE THERMIQUE RECEPTEUR SOLAIRE

- Bilan énergétique
- Efficacité thermique
- Matériaux sélectifs
- Effet cavité

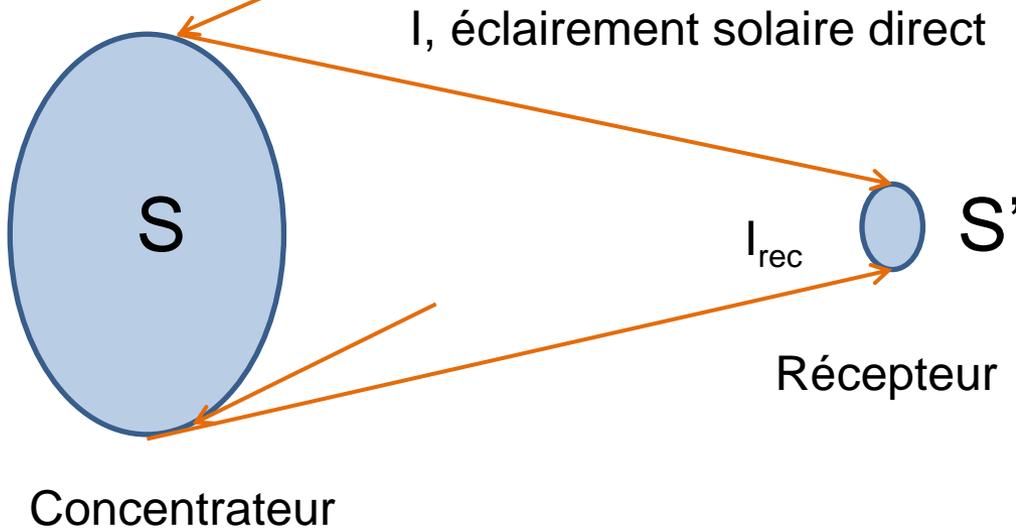
FLUIDES DE TRANSFERT

- Introduction: définitions, fluides disponibles
- Méthode de calcul du coefficient d'échange
- Propriétés thermophysiques
- Coefficients de transfert



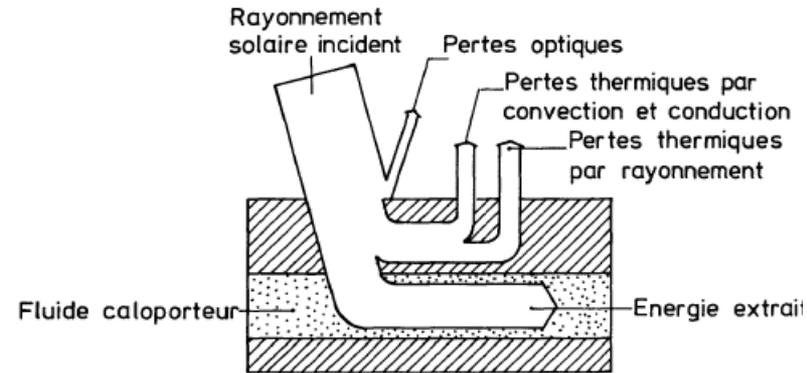
Equilibre thermique d'un récepteur solaire

Bilan énergétique



Le récepteur reçoit la densité d'énergie moyenne (éclairement), I_{rec} :

$$I_{rec} = I(S/S') = IC$$



Bilan d'énergie à la surface :

Puissance incidente sur S' = Puissance transférée au fluide de transfert + Pertes

Pertes = Réflexion (spectre solaire) + Convection + Emission IR

Efficacité thermique = (Puissance incidente – Pertes) / Puissance incidente

Efficacité thermique = Puissance transférée au fluide / Puissance incidente

Bilan énergétique

Bilan d'énergie à la surface :

Puissance incidente sur S' = Puissance transférée au fluide de transfert + Pertes

Pertes = Réflexion (spectre solaire) + Emission IR + Convection

Efficacité thermique = (Puissance incidente – Pertes) / Puissance incidente

$$CI = q_f + Pertes$$

$$q_f = h_{cond}(T_{wo} - T_{wi})$$

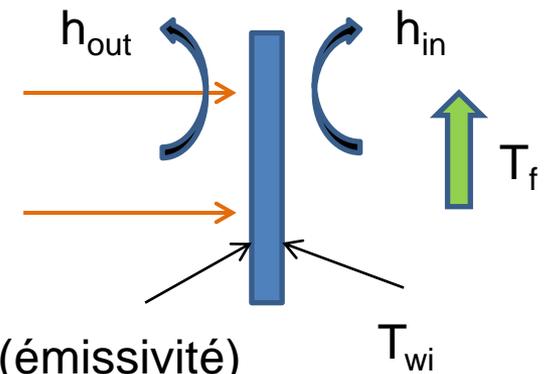
$$Pertes = \rho CI + h_{out}(T_{wo} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma_b (T_{wo}^4 - T_{amb}^4)$$

$$h_{cond} = \frac{2\lambda_w}{D \ln(D/d)}$$

$$q_f = h_{in}(T_{wi} - T_f)$$

Avec $\rho = 1 - \alpha$ (spectral)

T_{wo} , ρ (réflectivité) et ε (émissivité)





Bilan énergétique

$$\alpha CI = q_f + h_{out}(T_{wo} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma_b (T_{wo}^4 - T_{amb}^4)$$

Si on néglige les pertes par convection, l'efficacité thermique du récepteur s'écrit:

$$\eta_{th} = \alpha - \varepsilon \sigma_b (T_{wo}^4 - T_{amb}^4) / CI$$

Avec

α , absorptivité du récepteur dans le spectre solaire

ε , émissivité du récepteur dans le spectre IR

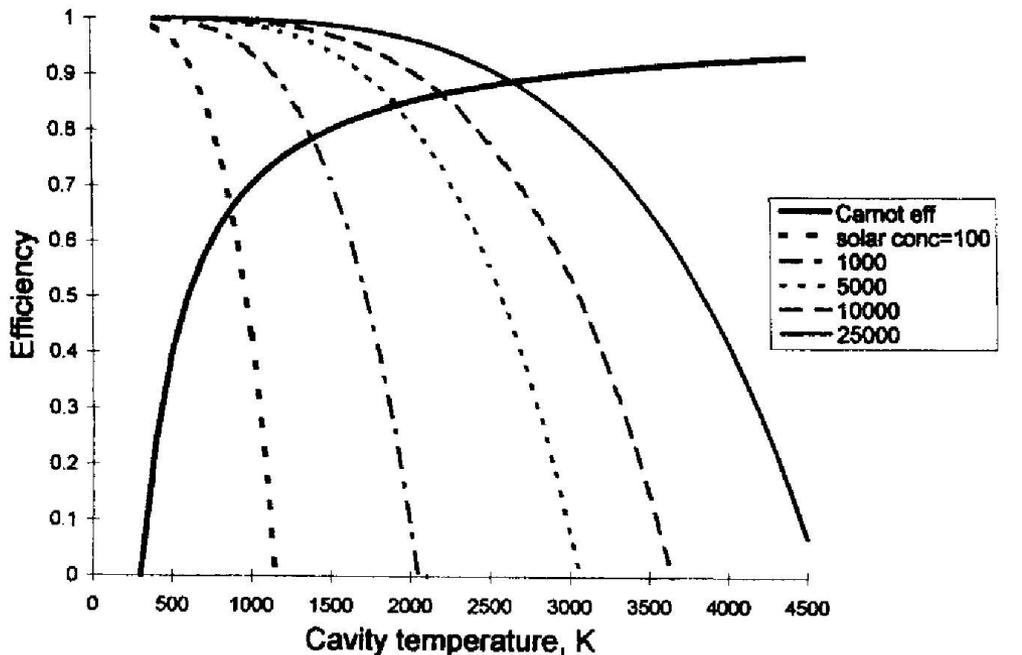
Pour un corps noir, $\alpha = \varepsilon = 1$, il vient

$$\eta_{th} = 1 - \sigma_b (T_{wo}^4 - T_{amb}^4) / CI$$

Efficacité thermique

Cas du corps noir

$$\eta_{th} = 1 - \sigma_b(T_{wo}^4 - T_{amb}^4)/CI$$



➤ L'efficacité thermique (ou rendement) du récepteur décroît avec la température et croît avec le concentration.

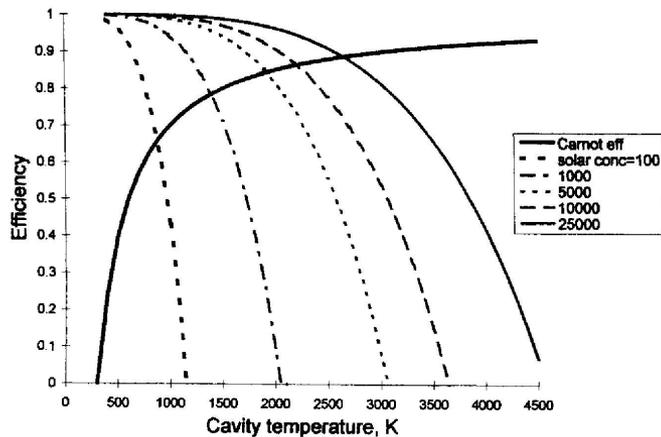
➤ Il existe une température pour laquelle l'efficacité est nulle (T stagnation).

➤ Par contre le rendement de Carnot croît avec T

Efficacité thermique

T et C optimales

Cas du corps noir



Le rendement de conversion thermodynamique est borné par le rendement de Carnot (second principe):

$$\eta_c = 1 - T_o/T_f$$

Avec $T_o \approx T_{amb}$ et $T_f \approx T_{wo} = T_r$, le rendement global s'écrit:

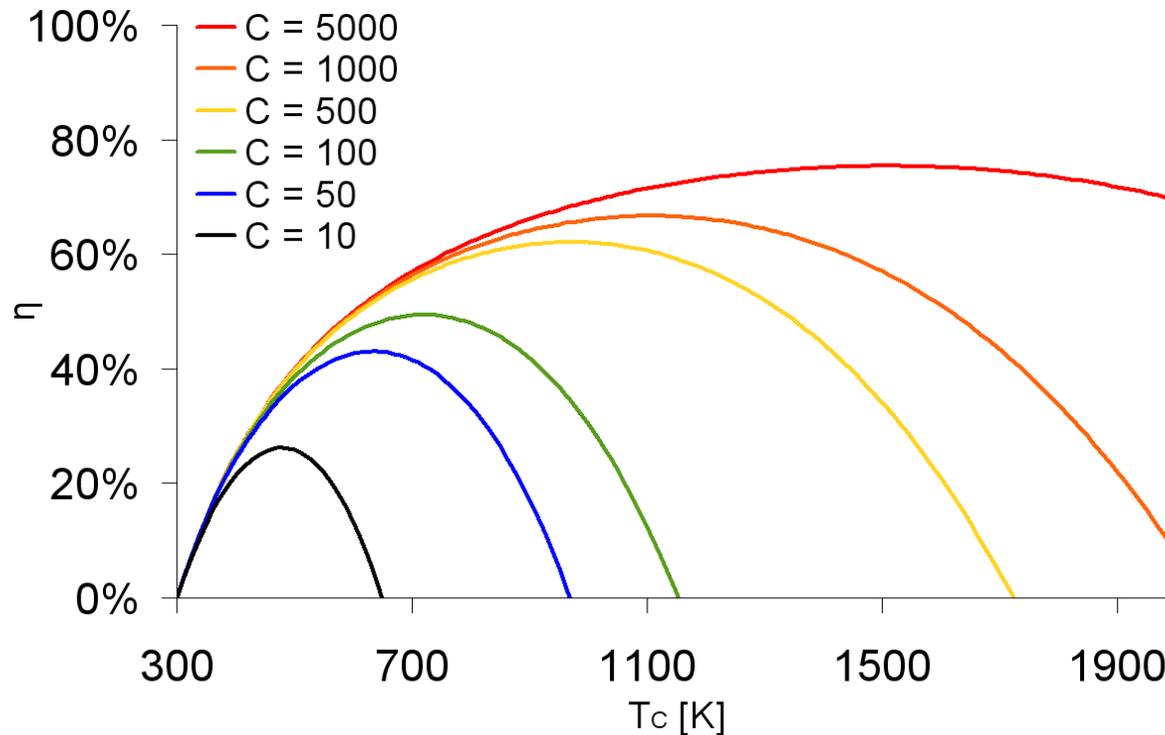
$$\eta_G = \eta_{th} \cdot \eta_c = (1 - \sigma T_r^4 / CI)(1 - T_o / T_r)$$

Efficacité thermique

T et C optimales

Cas du corps noir

$$\eta_G = (1 - \sigma T_r^4 / CI)(1 - T_o / T_r)$$



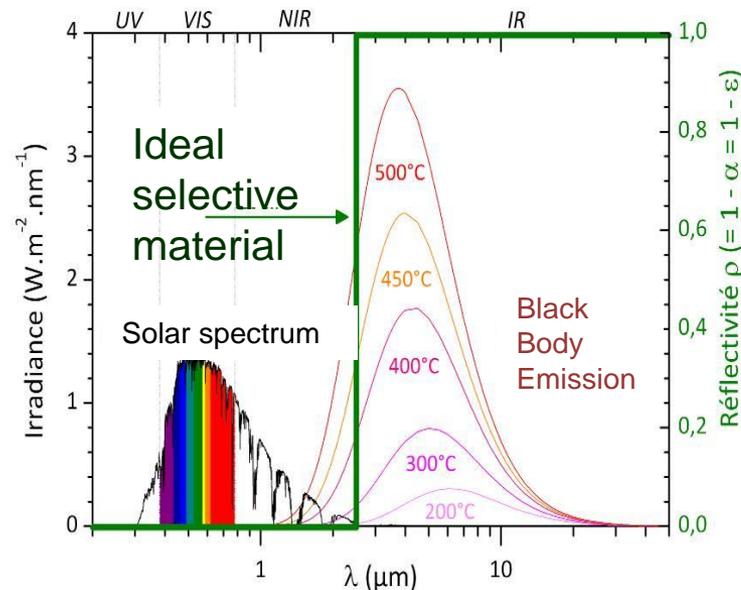
Efficacité thermique

Surface sélective

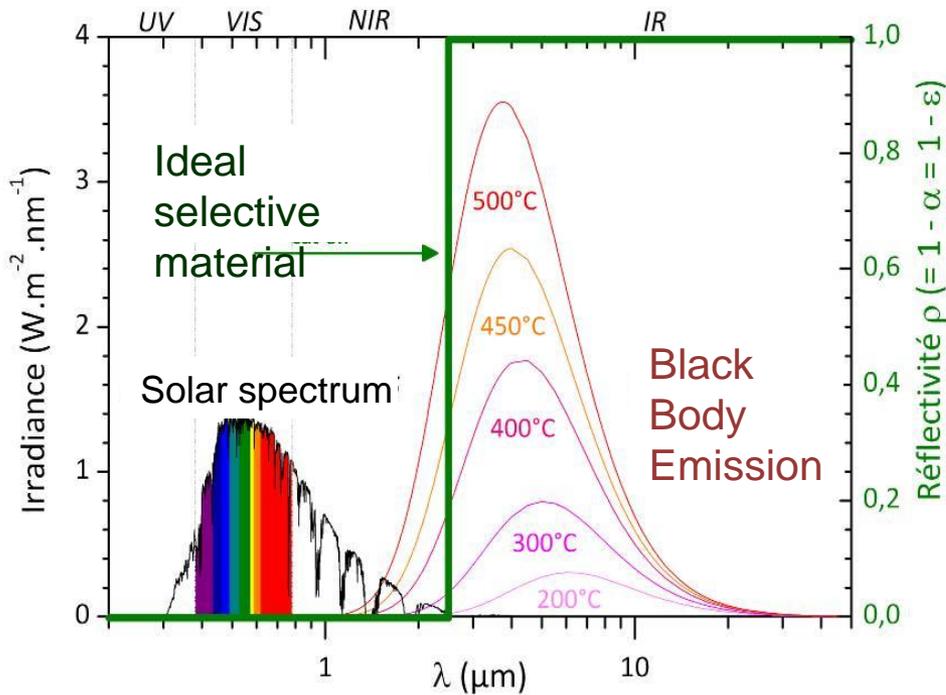
Comment augmenter η_G ?

$$\eta_{th} = \alpha - \varepsilon \sigma_b (T_r^4 - T_o^4) / CI$$

- Accroître l'absorptivité du récepteur dans le spectre solaire, α
- Diminuer émissivité du récepteur dans le spectre IR, ε
- Corps idéal : $\alpha = 1$ et $\varepsilon = 0$ (avec $\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon$)



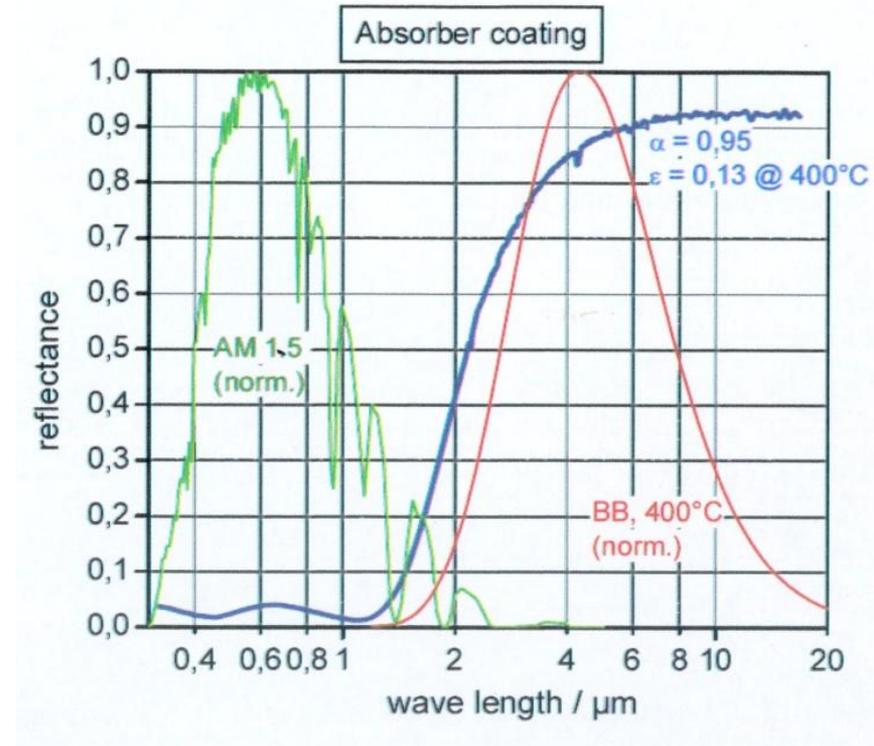
Matériaux sélectifs



Matériau idéal

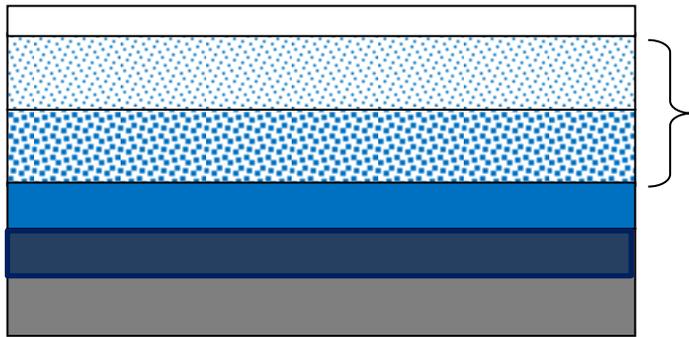
$$\alpha_{sol} = \frac{\int_{\lambda} \epsilon_{\lambda} I_{0,\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda} I_I d\lambda}$$

$$\epsilon_{IR} = \frac{\int_{\lambda} \epsilon_{\lambda} I_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda} I_b(\lambda, T) d\lambda}$$



Matériau réel

Matériaux sélectifs



Couche anti réflexion (oxyde, nitrure, carbure)

Couche absorbante spectre solaire (cermet)

Réflecteur IR (métal)

Barrière de diffusion (métal)

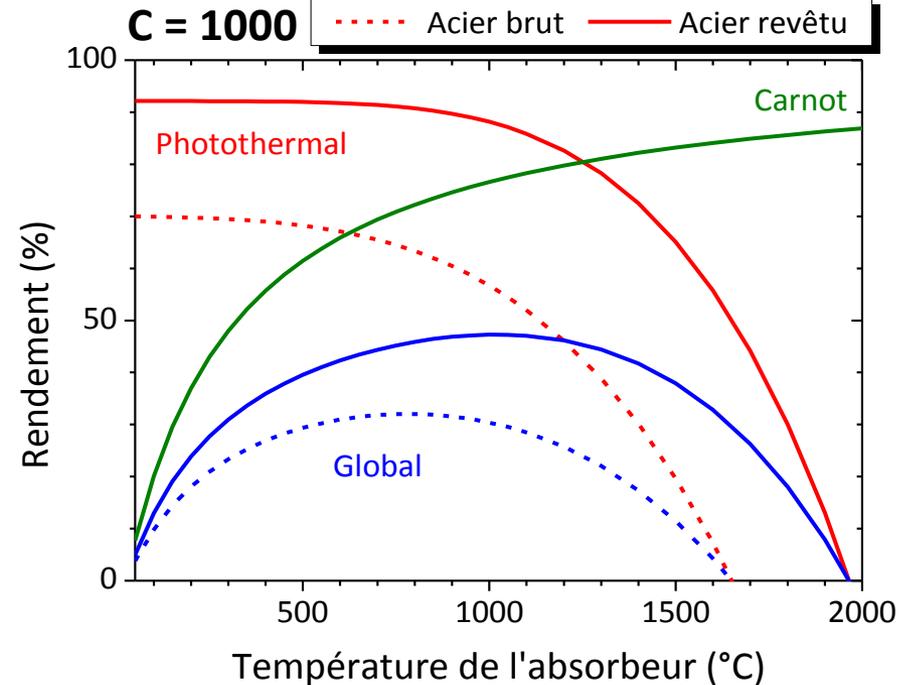
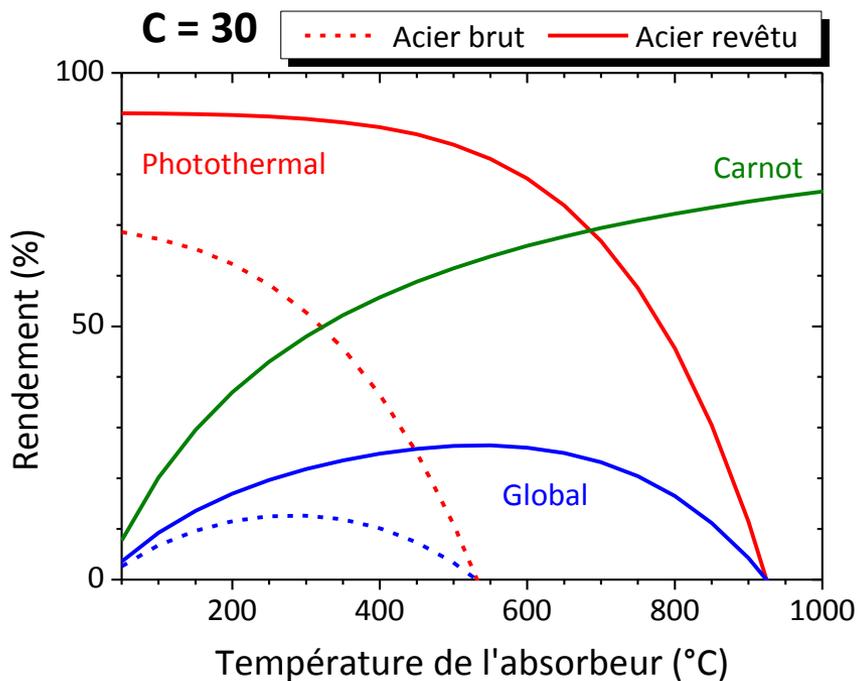
Paroi récepteur (métal)

AR	Al_2O_3
Cermet	Mo / Al_2O_3
IR -mirror	Mo
Barrier	Oxide
Metal Tube	

Exemple

Matériaux sélectifs

Résultats



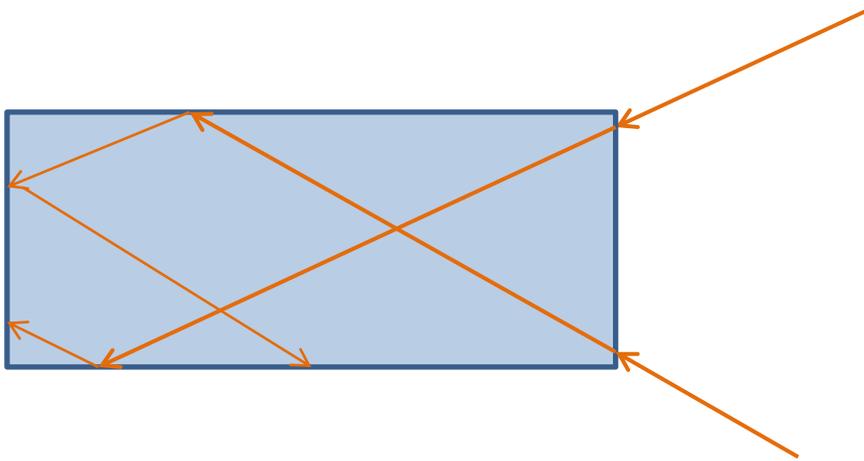
Sélectivité =

1. Déplacement de la température optimale
2. Accroissement du rendement (x2 à faible concentration)



Effet cavité

Accroissement de l'absorption solaire

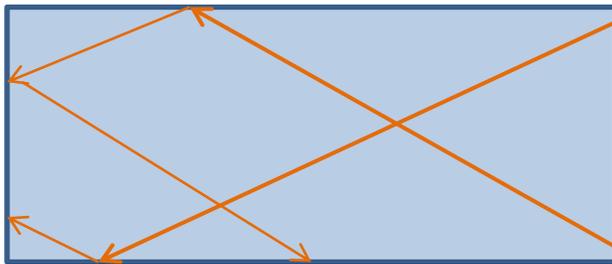


Avantages:

- Surface d'entrée faible → haute concentration
- Piège pour le rayonnement → absorptivité solaire élevée
- Grande surface d'échange

Effet cavité

Equilibre radiatif
Méthode des radiosités



Définition Surfaces grises et diffuses

Pour une surface:

Sur la surface le bilan d'énergie s'écrit :

$$\Phi_{\text{incident}} = \Phi_{\text{absorbé}} + \Phi_{\text{réfléchi}} \quad \text{et} \quad \alpha = \varepsilon = 1 - \rho$$

→ Eclairement $E = \Phi_i / S$ (Φ_i : flux incident)

→ Emittance $M = \varepsilon M^\circ$

$$M^\circ = \pi L^\circ$$

L° luminance du corps noir

→ Radiosité $J =$ somme des flux issus (partant) de S

$$J = \varepsilon M^\circ + \rho E$$

soit

$$J = \varepsilon M^\circ + (1 - \varepsilon)E$$

(surface grise)

Effet cavité

Equilibre radiatif
Méthode des radiosités

Définition

Surfaces grises et diffuses

flux net perdu = différence entre flux émis et flux absorbé soit :

$$\frac{\Phi_{\text{net}}}{S} = \varepsilon M^{\circ} - \varepsilon E$$

comme $\varepsilon M^{\circ} = J - (1 - \varepsilon)E$, il vient :

Flux perdu par S :

$$\frac{\Phi_{\text{net}}}{S} = J - E$$

(radiosité-éclairage)

Effet cavité

Equilibre radiatif
Méthode des radiosités

Enceinte constituée de surfaces grises et diffuses

Calcul de J_i : La radiosité de S_i est égale à son émittance + les flux réfléchis par S_i en provenance de toutes les surfaces de l'enceinte (y compris S_i si elle est concave).

. Emittance propre : $\varepsilon_i M_i^o$

. Flux incident sur S_i : $\sum_{j=1}^n S_i F_{ij} J_j = S_i \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j$

F_{ij} = facteur de forme entre i et j

. Densité de flux réfléchi par l'unité de surface S_i :

$$\rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j = (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j$$

Effet cavité

Equilibre radiatif
Méthode des radiosités

$$\text{d'où } J_i = \varepsilon_i M^o_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j$$

ou

$$J_i - (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j = \varepsilon_i M^o_i$$

s'écrit encore : $\sum_{j=1}^n [\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) F_{ij}] J_j = \varepsilon_i M^o_i = \varepsilon_i \sigma T^4_i$ (équation pour T imposée)

Dans le cas de flux imposés (connus) :

On calcule le flux net perdu par S_i soit :

$$\varphi_{\text{inet}} = \frac{\Phi_{\text{inet}}}{S_i} = J_i - \sum_{j=1}^n F_{ij} J_j$$

soit :

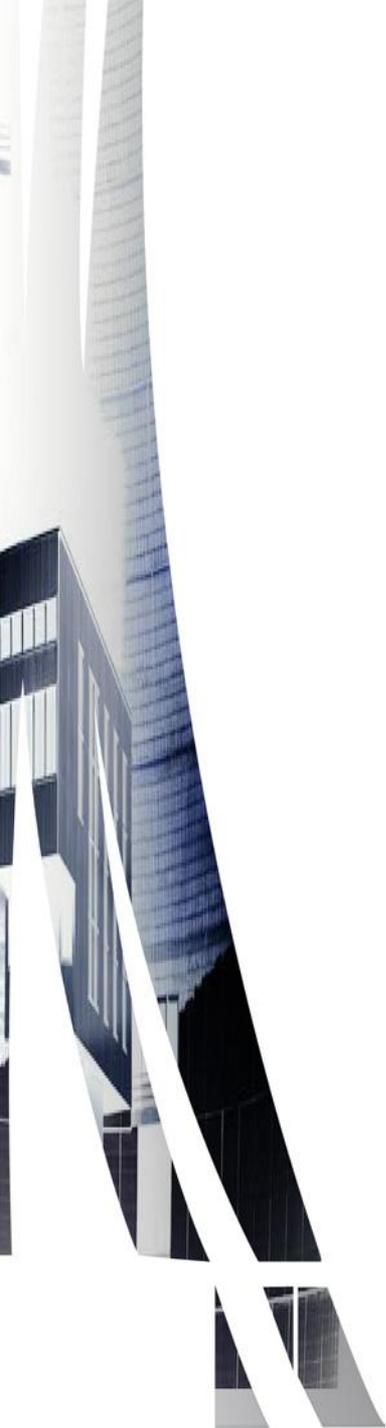
$$\varphi_{\text{inet}} = \sum_{j=1}^n (\delta_{ij} - F_{ij}) J_j$$

$$\varphi_{\text{inet}} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (\sigma T^4_i - J_i)$$

Avec

d'une façon générale : $S_i F_{ij} = S_j F_{ji}$

et pour une enceinte fermée : $\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1$



Les fluides de transfert

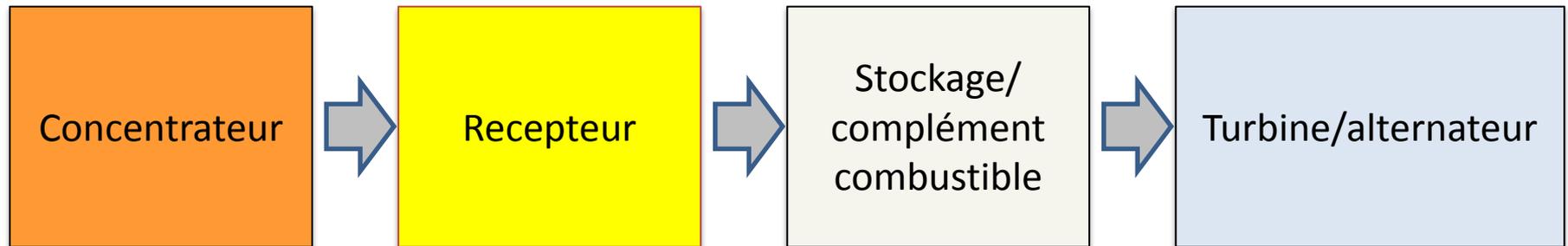
H. Benoit et al. Renewable & Sustainable Energy Review, à paraître, 2016

Motivation

Radiation

Fluide de transfert

Working Fluid





Propriétés attendues

- Domaine de température de fonctionnement étendu (stabilité à HT).
- Propriétés thermophysiques adaptées.
Conductivité thermique (λ) élevée pour favoriser le transfert à la paroi et faible viscosité (μ) pour réduire les pertes de charge et la puissance de pompage. Par ailleurs si le fluide est également utilisé comme fluide de stockage une grande capacité thermique (cp) est indispensable
- Faible pression de vapeur
- Faible toxicité et sécurité pour les opérateurs
- Coût faible



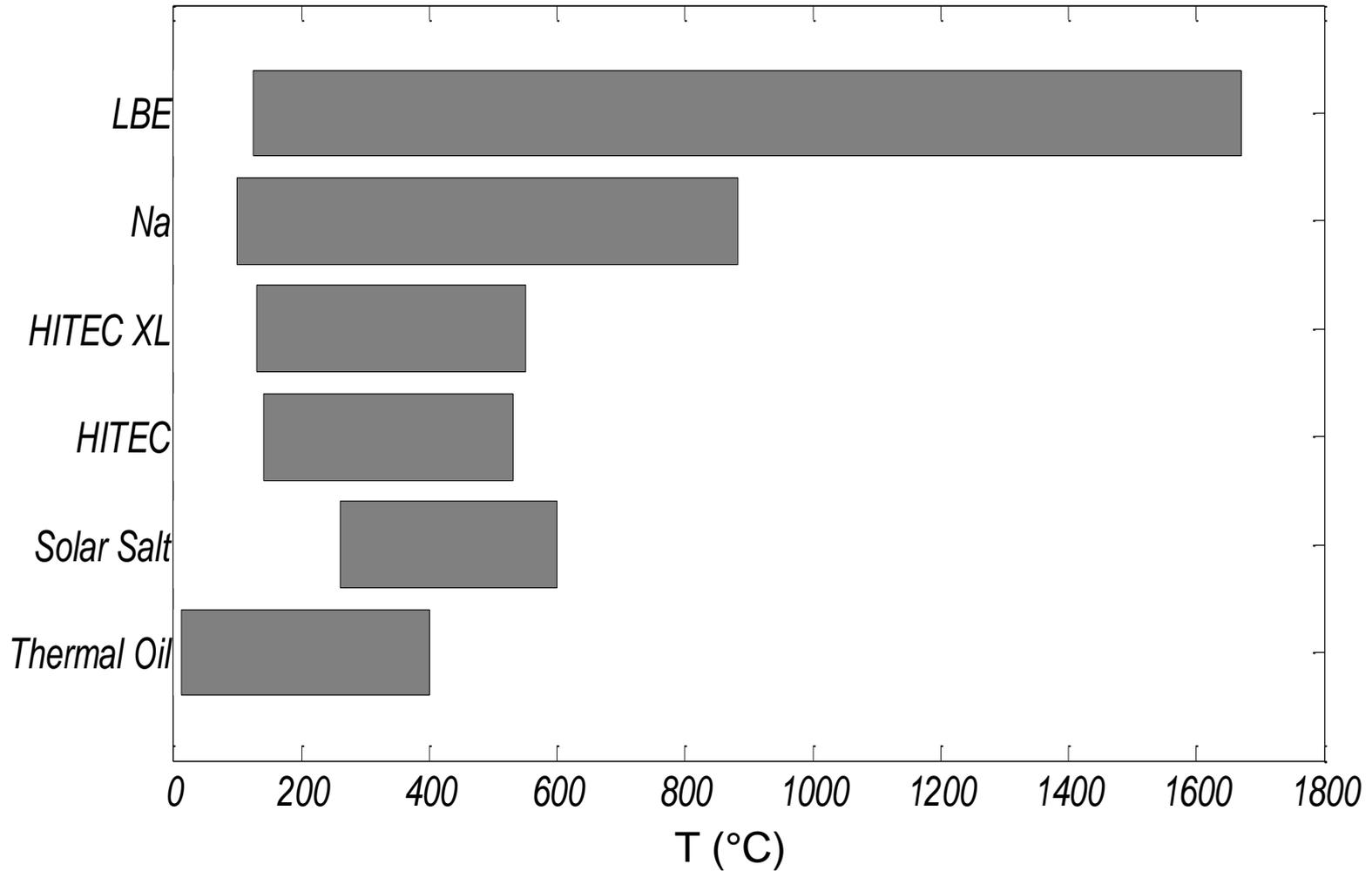
Fluides disponibles

Fluide de transfert	Phase	Pression	Temperature limite
Huile thermique	Liquide	> atm.	400°C
Sel fondu (nitrates)	Liquide	atm.	560°C
Air (gas)	gaz	Atm. ou HP	Plus de 1000°C
Eau/vapeur	Liquide/gaz	Haute pression	≈ 550°C (sous-critique)

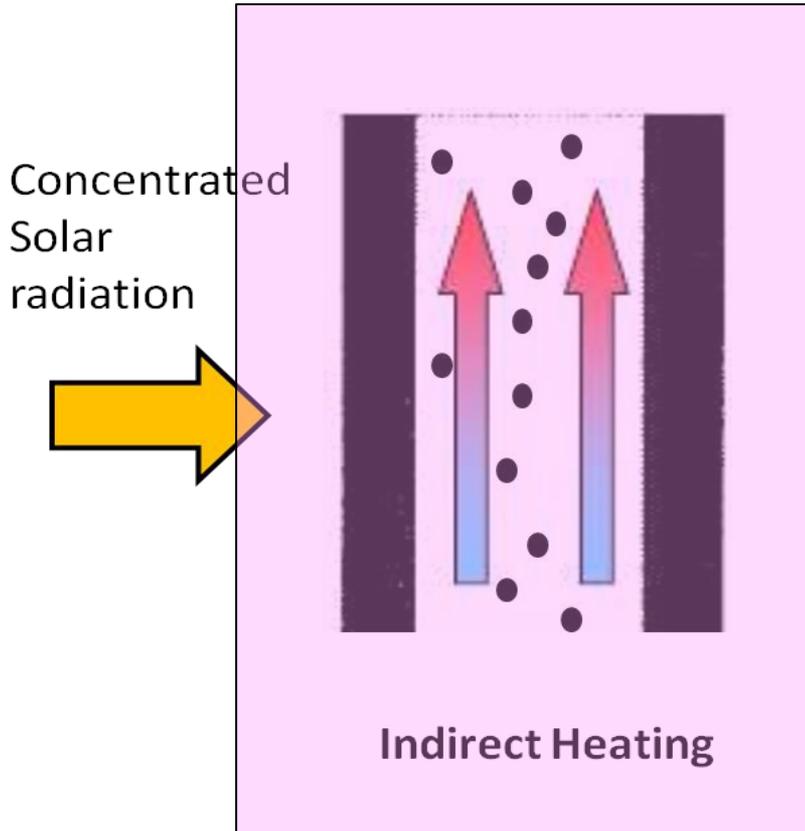
Liquides disponibles

Name	Formula	T _{melt} (°C)	T _{max} (°C)
Therminal VP-1	(C ₁₂ H ₁₀) and (C ₁₂ H ₁₀ O). Percentage not know.	12	390
Solar Salt	wt. 60% NaNO ₃ /40% KNO ₃	220	600
Hitec	wt. 53% KNO ₃ /7% NaNO ₃ /40% NaNO ₂	142	454–538
Hitec XL	wt. 48% Ca(NO ₃) ₂ /7% NaNO ₃ /45% KNO ₃	133	500
NS-1	wt. 44% Ca(NO ₃) ₂ /12% NaNO ₃ /44% KNO ₃	127.6	622
NS-2	wt. 25.9% LiNO ₃ /20.0% NaNO ₃ /54.1% KNO ₃	118	435
NS-3	wt. 30% LiNO ₃ /18% NaNO ₃ /52% KNO ₃	120	550
NS-4	wt. 50-80% KNO ₃ /0-25% LiNO ₃ /10-45% Ca(NO ₃) ₂	100	500
NS-5	wt. 17.77% LiNO ₃ /15.28% NaNO ₃ /35.97% KNO ₃ / 30.98% 2KNO ₃ · Mg(NO ₃) ₂	100	
NS-6	wt. 17.5% LiNO ₃ /14.2% NaNO ₃ /50.5% KNO ₃ / 17.8% NaNO ₂	99	500
NS-7	wt. 6% NaNO ₃ /23% KNO ₃ /8% LiNO ₃ / 19% Ca(NO ₃) ₂ /44% CsNO ₃	65	561

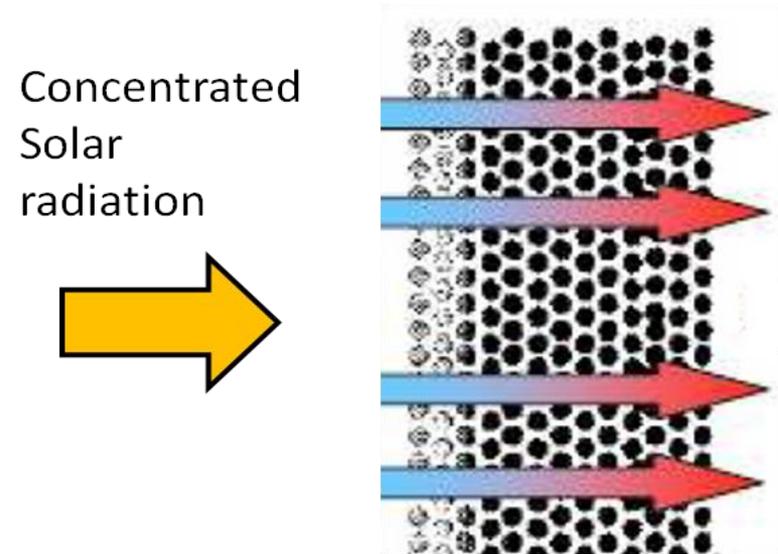
Liquides disponibles



Configuration



Tubes, canaux ...

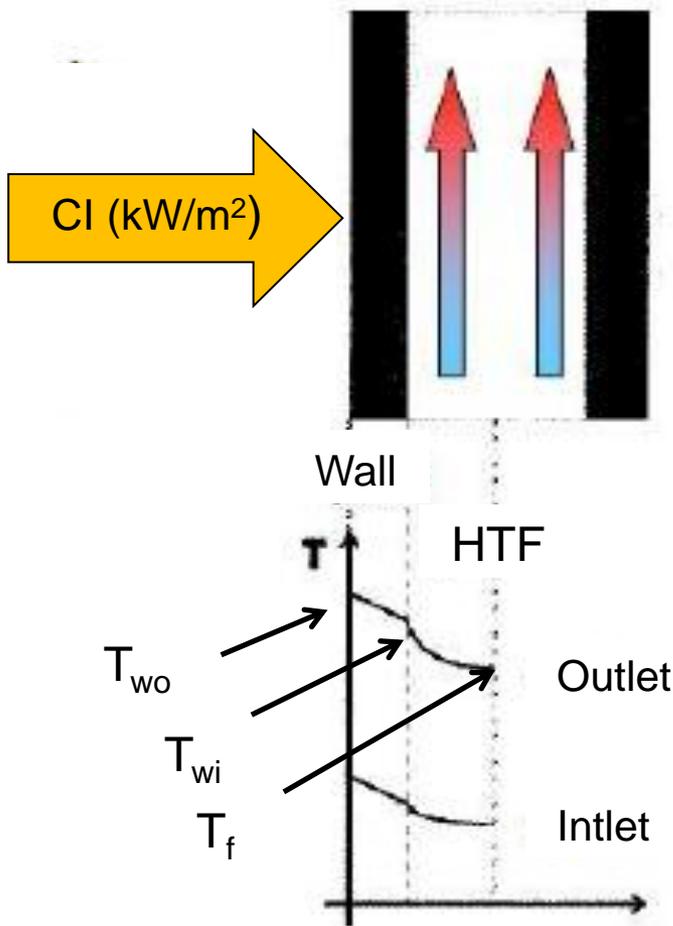


Monolithes, mousses ...

$\Phi = h (T_w - T_f)$, plus h est grand moins T_w est élevée pour un même flux

Calcul du coefficient d'échange

Tube of receiver



$$\alpha CI = q_f + h_{out}(T_{wo} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma_b (T_{wo}^4 - T_{amb}^4)$$

Vers le fluide

Pertes

$$q_f = h_{cond}(T_{wo} - T_{wi})$$

$$h_{cond} = \frac{2\lambda_w}{D \ln(D/d)}$$

$$q_f = h_{in}(T_{wi} - T_f)$$

$$-\lambda_f \left(\frac{dT}{dx} \right)_w = h_{in}(T_{wi} - T_f)$$

Pour tenir compte des conditions d'écoulement:

$$\lambda_f \approx \lambda_{fc} + \lambda_{ft}$$



Calcul du coefficient d'échange

Le coefficient d'échange est calculé à partir de corrélations liant les nombres adimensionnels Nu versus Re et Pr (dépendance aux conditions d'écoulement)

$$Nu = hd/\lambda$$

$$Re = \rho v d / \mu, \text{ Ecoulement turbulent: } Re > 3000-10\ 000$$

$$Pr = \mu C_p / \lambda$$

Pour les calculer il est nécessaire de connaître: la masse volumique (ρ), la viscosité (μ), la conductivité thermique (λ) et chaleur spécifique (C_p) en fonction de la température.

Propriétés thermophysiques

LIQUIDES

Therminol VP-1 (after [29])

$$c_p = 2.82 T + 716 \quad (23) \quad 285 \text{ K} < T < 673 \text{ K}$$

$$\lambda = 1.73 \times 10^{-7} T^2 + 7.62 \times 10^{-6} T + 0.14 \quad (24) \quad 285 \text{ K} < T < 673 \text{ K}$$

$$\rho = -7.61 \times 10^{-4} T^2 - 2.24 \times 10^{-1} T + 1191 \quad (25) \quad 285 \text{ K} < T < 673 \text{ K}$$

$$\mu = (-2.3 \times 10^{-5} T^3 + 5.61 \times 10^{-3} T^2 - 19.89 T + 1822)^{-1} \quad (26) \quad 285 \text{ K} < T < 673 \text{ K}$$

Sels fondus

Solar Salt (after [31])

$$c_p = 1443 + 0.172 (T - 273.15) \quad (27) \quad 533 \text{ K} < T < 873 \text{ K}$$

$$\lambda = 0.443 + 1.9 \times 10^{-4} (T - 273.15) \quad (28) \quad 533 \text{ K} < T < 873 \text{ K}$$

$$\rho = 2090 - 0.636 (T - 273.15) \quad (29) \quad 533 \text{ K} < T < 873 \text{ K}$$

$$\mu = 2.2714 \times 10^{-2} - 1.2 \times 10^{-4} (T - 273.15) + 2.281 \times 10^{-7} (T - 273.15)^2 - 1.474 \times 10^{-10} (T - 273.15)^3 \quad (30) \quad 533 \text{ K} < T < 873 \text{ K}$$

Hitec (after [32])

$$c_p = 1.56 \times 10^3 \quad (31) \quad 415 \text{ K} < T < 808 \text{ K}$$

$$\lambda = 0.411 + 4.36 \times 10^{-4} (T - 273.15) - 1.54 \times 10^{-6} (T - 273.15)^2 \quad (32) \quad 415 \text{ K} < T < 808 \text{ K}$$

$$\rho = -0.74 \times (T - 273.15) + 2084 \quad (33) \quad 415 \text{ K} < T < 808 \text{ K}$$

$$\mu = 10^{2.7374} \times (T - 273.15)^{-2.104} \quad (34) \quad 415 \text{ K} < T < 808 \text{ K}$$

Hitec XL (after [34])

$$c_p = -0.33 T + 1634 \quad (35) \quad 403 \text{ K} < T < 823 \text{ K}$$

$$\lambda = 0.519 \quad (36) \quad 403 \text{ K} < T < 823 \text{ K}$$

reported as a constant value

$$\rho = 2240 - 0.827 \times (T - 273.15) \quad (37) \quad 403 \text{ K} < T < 823 \text{ K}$$

$$\mu = 10^{6.1374} \times (T - 273.15)^{-3.36406} \quad (38) \quad 403 \text{ K} < T < 823 \text{ K}$$

Propriétés thermophysiques

<i>Métaux liquides</i>		
Sodium (after [34])		
$c_p = 1658.2 - 0.84790 T + 4.4541 \times 10^{-4} T^2 - 2.9926 \times 10^6 T^{-2}$ (39)		371 K < T < 1255 K
$\lambda = 124.67 - 0.11381 T + 5.5226 \times 10^{-5} T^2 - 1.1842 \times 10^{-8} T^3$ (40)		371 K < T < 1255 K
$\rho = 219 + 275.32 \left(1 - \frac{T}{2503.7}\right) + 511.58 \left(1 - \frac{T}{2503.7}\right)^{0.5}$ (41)		371 K < T < 1255 K
$\ln(\mu) = -6.4406 - 0.3958 \ln(T) + \frac{556.835}{T}$ (42)		371 K < T < 1255 K
Eutectique Plomb-bismuth (after [36])		
$c_p = 159 - 2.72 \times 10^{-2} T + 7.12 \times 10^{-6} T^2$ (43)		400 K < T < 1500 K
$\lambda = 3.61 + 1.517 \times 10^{-2} T - 1.741 \times 10^{-6} T^2$ (44)		400 K < T < 1100 K
$\rho = 11096 - 1.3236 T$ (45)		400 K < T < 1300 K
$\mu = 0.000494 \exp\left(\frac{6270}{RT}\right)$ (46)		400 K < T < 1500 K

Corrélations

<i>Author</i>	<i>Correlation</i>	<i>Validity range</i>
<i>Usual correlations</i>		
Dittus-Boelter [31]	$Nu_1 = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (10)$	$0.7 \leq Pr \leq 120$ $10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ $L/D > 60$
Sieder-Tate [32]	$Nu_2 = 0,027Re^{0,8}Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (11)$	$0.7 \leq Pr \leq 120$ $Re \geq 10^4$ $L/D > 60$ (smooth pipes)
Hausen [33]	$Nu_3 = 0,037(Re^{0,75} - 180)Pr^{0,42}$ $\times [1 + (d/L)^{2/3}] \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (12)$	$0.5 \leq Pr \leq 1000$ $2300 \leq Re \leq 10^6$
	$Nu_{0,4} = \frac{Re_b Pr_b (f/2)}{1,07 + 12,7 (Pr_b^{2/3} - 1) (f/2)^{0,5}} \quad (13)$	
Petukhov [34]	with $f = [1.58 \ln(Re_b) - 3.28]^{-2} \quad (14)$	
(with exponent n from Sleicher and Rouse [41])	Correction for liquids: $Nu_4 = Nu_{40} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,11} \quad (15)$ Correction for gases: $Nu_4 = Nu_{40} \left(\frac{T_w}{T_b}\right)^n \quad (16)$	$0.5 \leq Pr \leq 2000$ $10^4 \leq Re \leq 5 \times 10^6$
	with $n = -(\log_{10}(T_w/T_b))^{1/4} + 0.3$ (8)	

Corrélations

$$Nu_x = \frac{(\xi/8)(Re_b - 1000)Pr_b}{1 + 12.7 \sqrt{\xi/8} (Pr_b^{2/3} - 1)} \times [1 + (d/L)^{2/3}]K \quad (17)$$

Gnielinski
(for turbulent flow)
[36]
(with exponent n
from Sieder and
Rouse [41])

with

$$\xi = [1.84 \log_{10}(Re_b) - 1.64]^{-2} \quad (18)$$

Correction for liquids:

$$K = \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.11} \quad (9)$$

Correction for gases:

$$K = \left(\frac{T_w}{T_b}\right)^n \quad (6)$$

with

$$n = -(\log_{10}(T_w/T_b))^{1/4} + 0.3 \quad (8)$$

$$0.5 \leq Pr \leq 2000$$

$$4 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^6$$

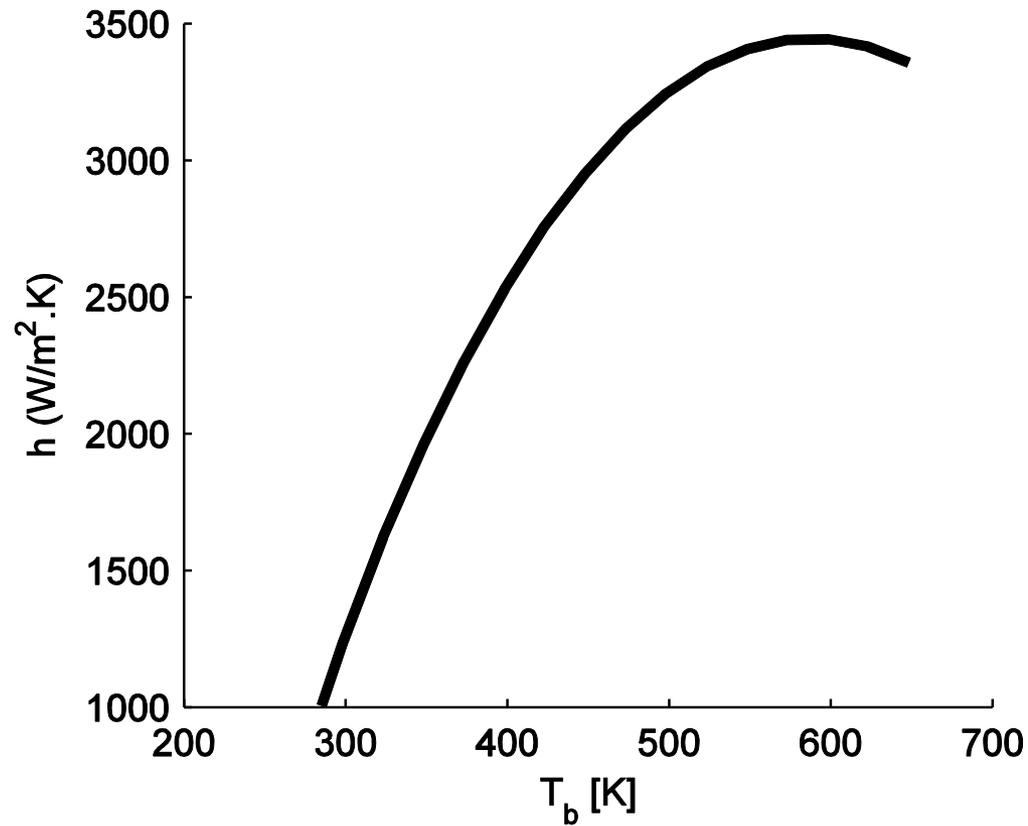
Corrélations

<i>Correlations specific to molten salts</i>		
Liu et al [37]	$Nu_s = 0,0242 Re^{0,81} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14}$ (19)	$12,7 \leq Pr \leq 14,7$ $1,7 \times 10^4 \leq Re \leq 4,5 \times 10^4$
Wu et al [38]	Transition flow: $Nu_{s,trans} = 0,00154 Re^{1,1} Pr^{1/3}$ (20)	$1,6 \leq Pr \leq 23,9$ $2300 \leq Re \leq 10^4$
	Turbulent flow: $Nu_{s,turb} = 0,02948 Re^{0,787} Pr^{1/3}$ (21)	$1,6 \leq Pr \leq 23,9$ $10^4 \leq Re \leq 4,6 \times 10^4$
<i>Correlations specific to liquid metals</i>		
<i>Liquid sodium Na</i>		
Lyon-Martinelli [40]	$Nu_\gamma = 7,0 + 0,025 \left(\frac{Pe}{Pr_t}\right)^{0,8}$ (22) with Pr_t the turbulent Prandtl number	
	$Nu_\delta^* = 6,3 + 0,0167 Re_{film}^{0,85} Pr_w^{0,93}$ (23)	
Sleicher-Rouse [41]	*constant heat flux $Nu_\delta^{**} = 4,8 + 0,0156 Re_{film}^{0,85} Pr_w^{0,93}$ (21) **constant surface temperature	$Pr \leq 0,1$ $10^4 \leq Re \leq 10^6$
<i>Lead-Bismuth Eutectic LBE</i>		
Cheng et al [42]	$Nu_{1,0} = A + 0,018 Pe^{0,8}$ (24) with $A = \begin{cases} 4,5 & Pe \leq 1000 \\ 5,4 - 9 \times 10^{-4} Pe & 1000 \leq Pe \leq 2000 \\ 3,6 & Pe \geq 2000 \end{cases}$	

Coefficients de transfert



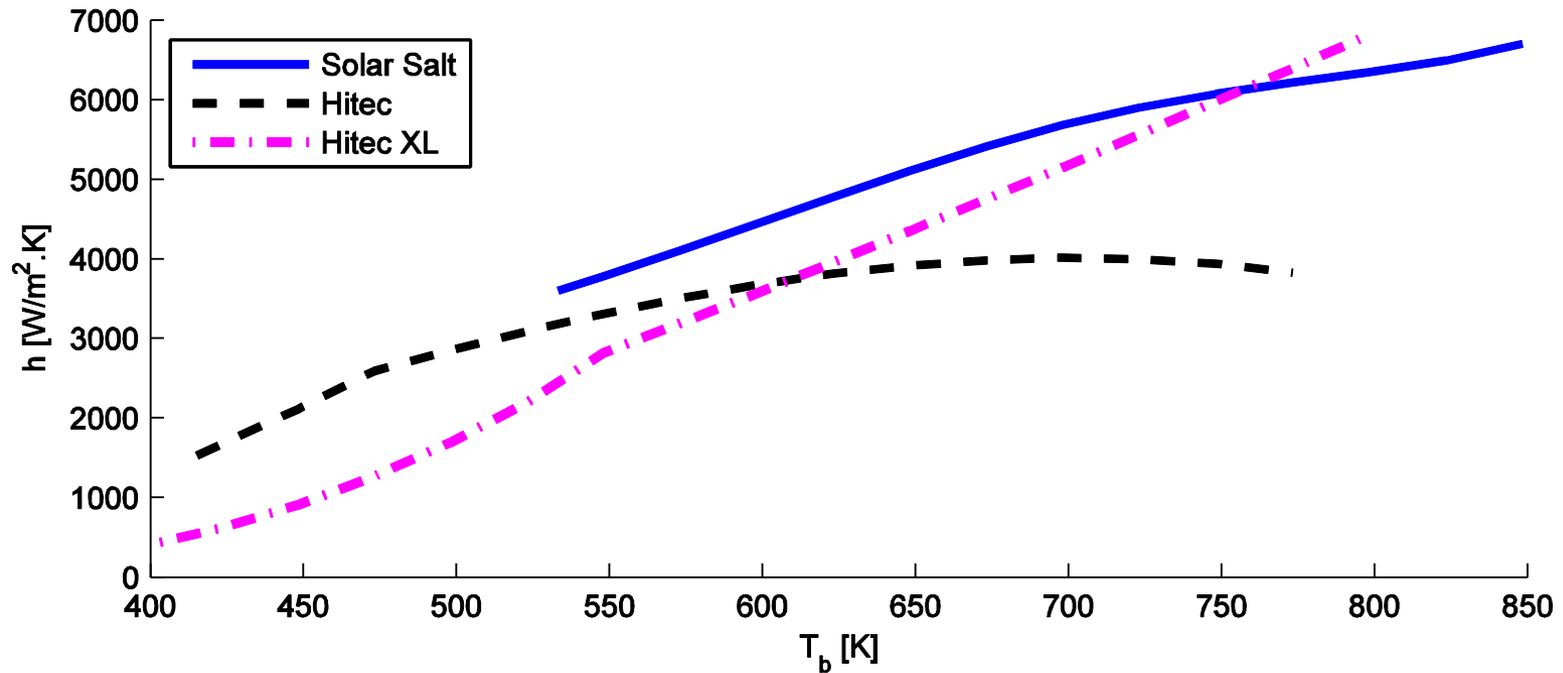
$V = 2 \text{ m/s}$



Huile « Therminol VP1 »

Coefficients de transfert

$V = 2 \text{ m/s}$



Sels fondus

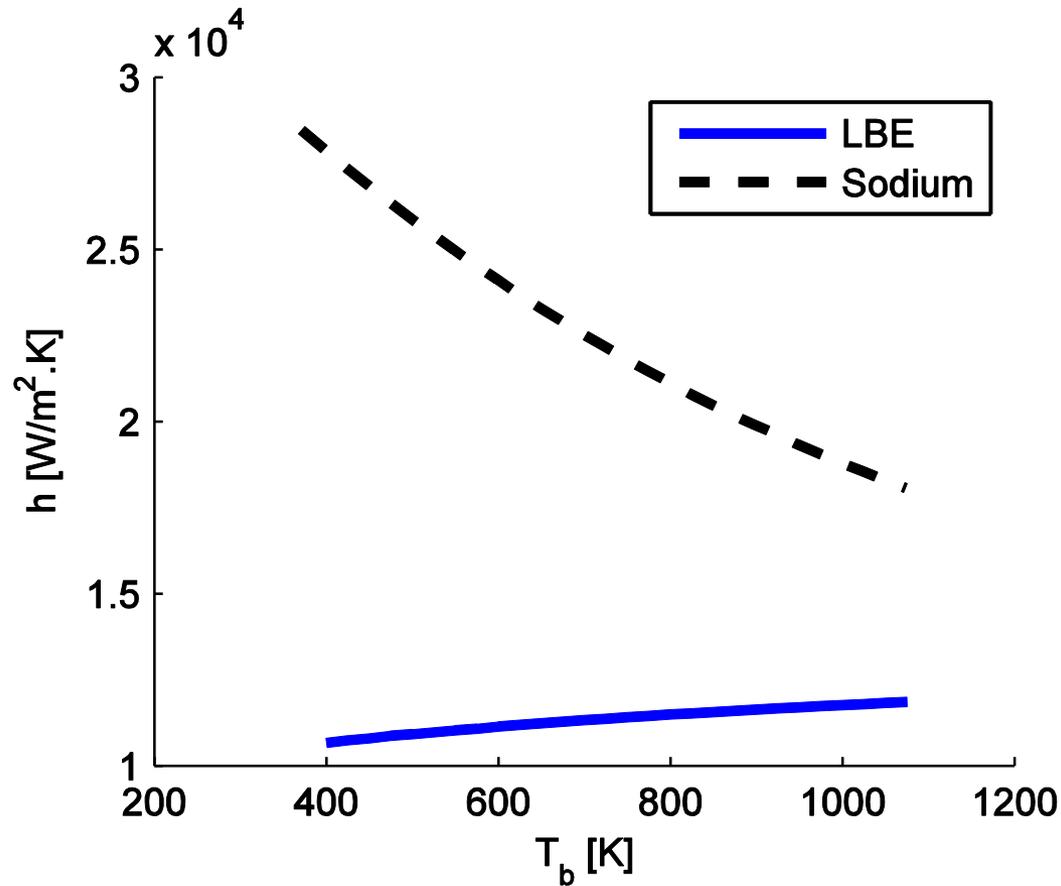
Solar salt: (60%wt NaNO_3 , 40%wt KNO_3)

HITEC (7%wt NaNO_3 , 40%wt NaNO_2 , 53%wt KNO_3),

HITEC XL (7%wt NaNO_3 , 45%wt KNO_3 , 48%wt $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)

Coefficients de transfert

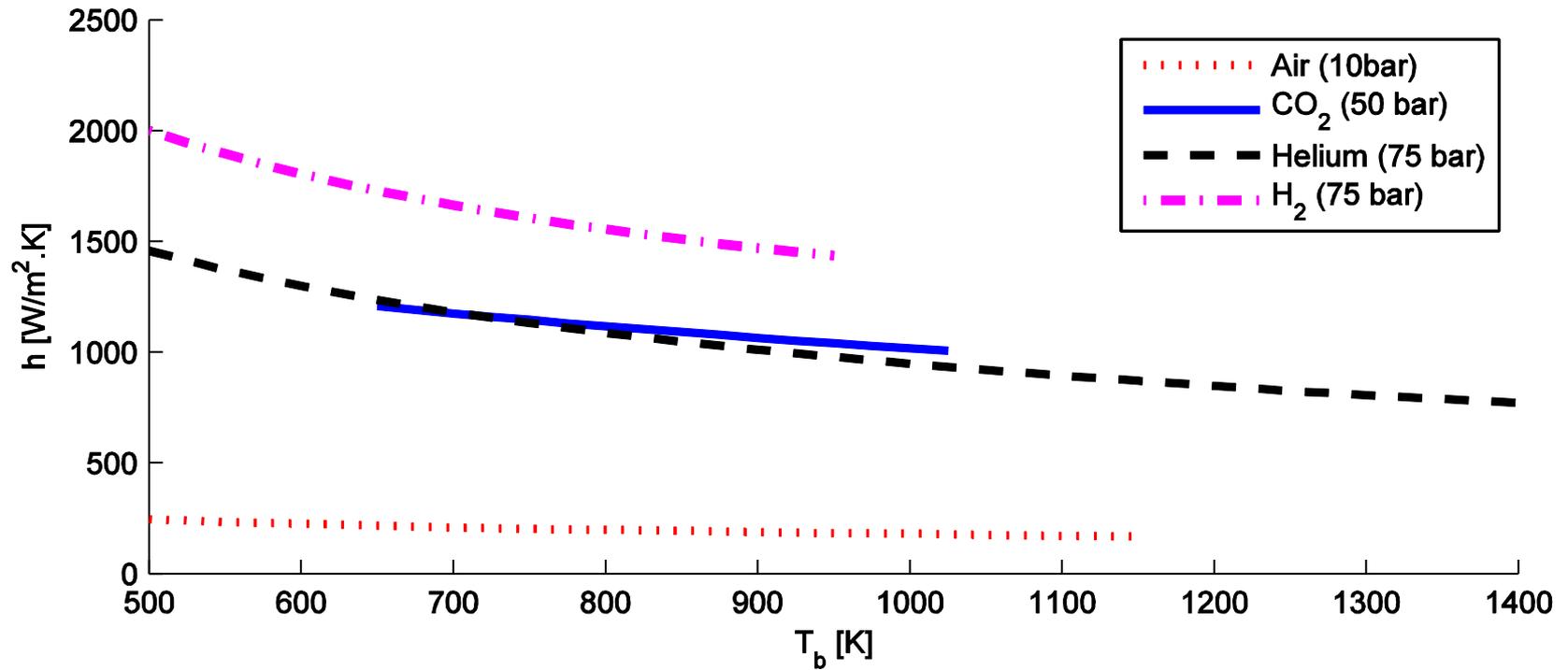
$V = 2 \text{ m/s}$



Sodium et Pb-Bi

Coefficients de transfert

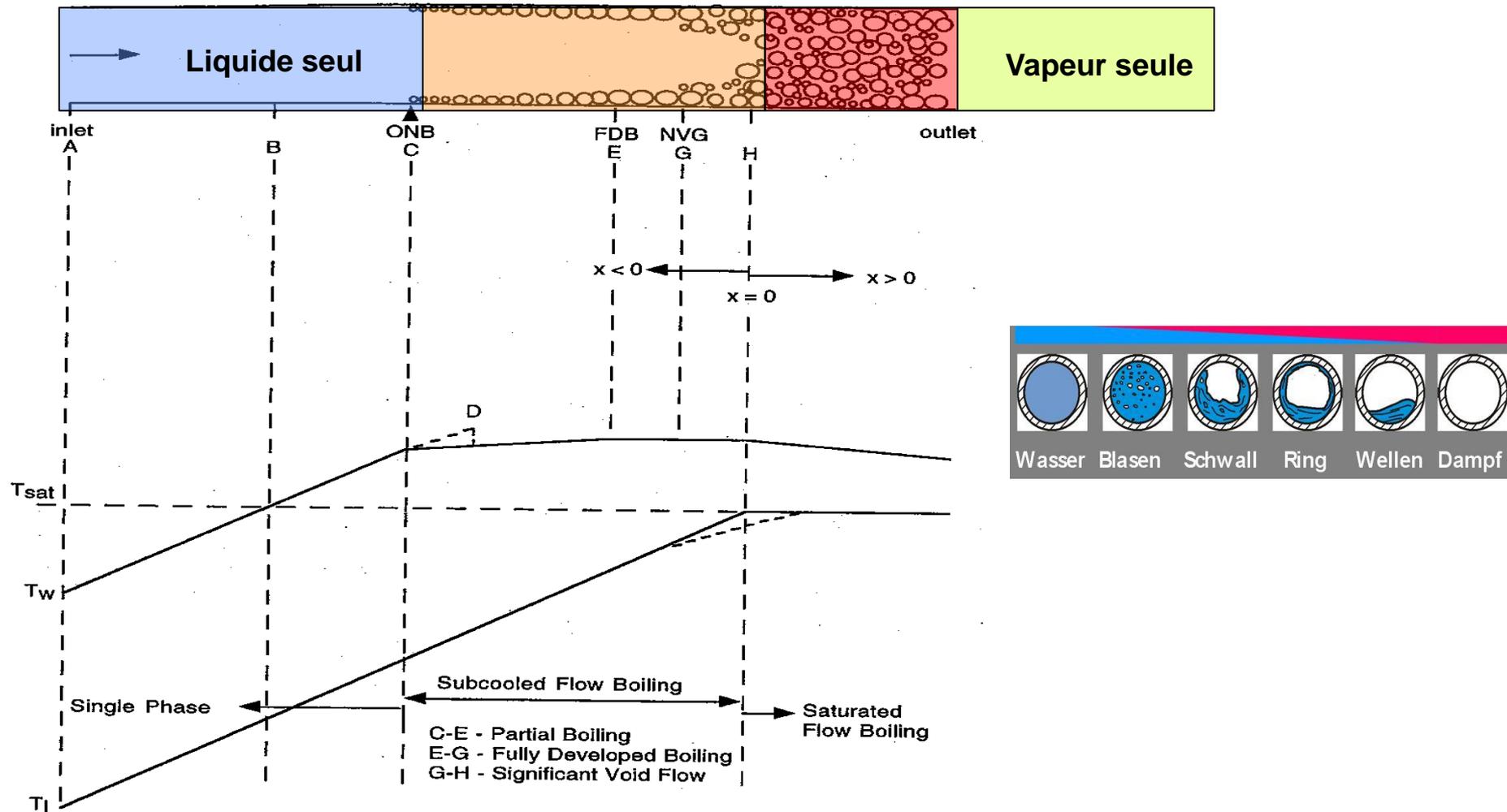
$V = 15 \text{ m/s}$



Comparaison pour différents gaz

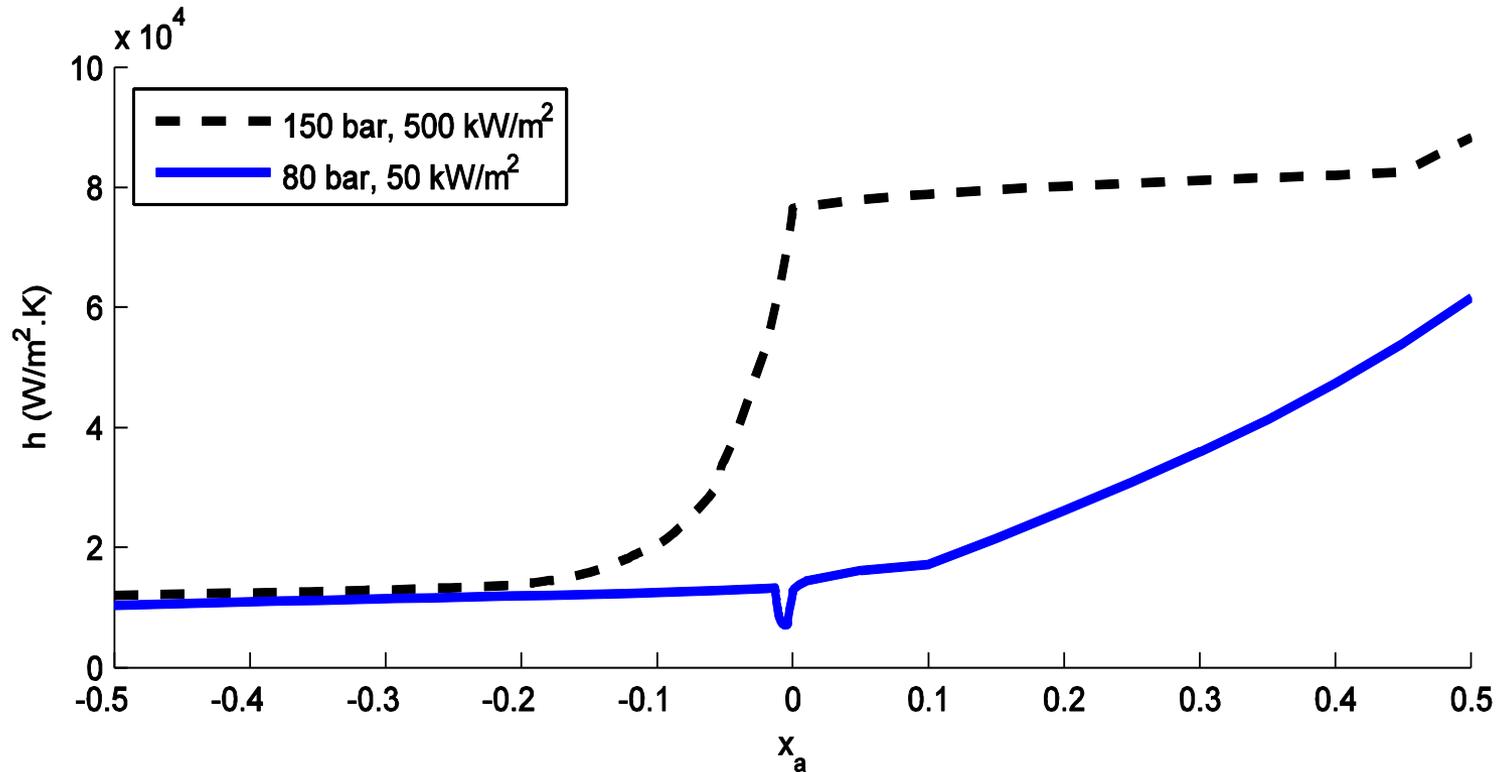
Coefficients de transfert

Cas particulier de l'eau



Coefficients de transfert

Cas particulier de l'eau



Coefficient de transfert pour l'eau de la région liquide à la région d'ébullition saturée en fonction de la qualité thermodynamique apparent pour un flux massique de 1444 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Conclusion

- L'absorptivité solaire et l'émissivité IR sont les paramètres clés gouvernant l'efficacité thermique des récepteurs solaires
- La sélectivité spectrale et l'effet cavité permettent d'accroître de façon importante l'efficacité des récepteurs
- Le coefficient de transfert convection paroi – fluide de transfert est gouverné par la conductivité thermique du fluide, ce qui explique les très grandes variations de h .

Merci de votre attention

