

PIEGE HYPERTHERMIQUE DU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT (PHRSD)

NOTE SCIENTIFIQUE

mars 2008



<http://sycomoreen.free.fr>

Le présent document vise à quantifier les dimensions et ordres de grandeur énergétiques typiques d'un PHRSD dont le principe de fonctionnement est expliqué ci-dessous :

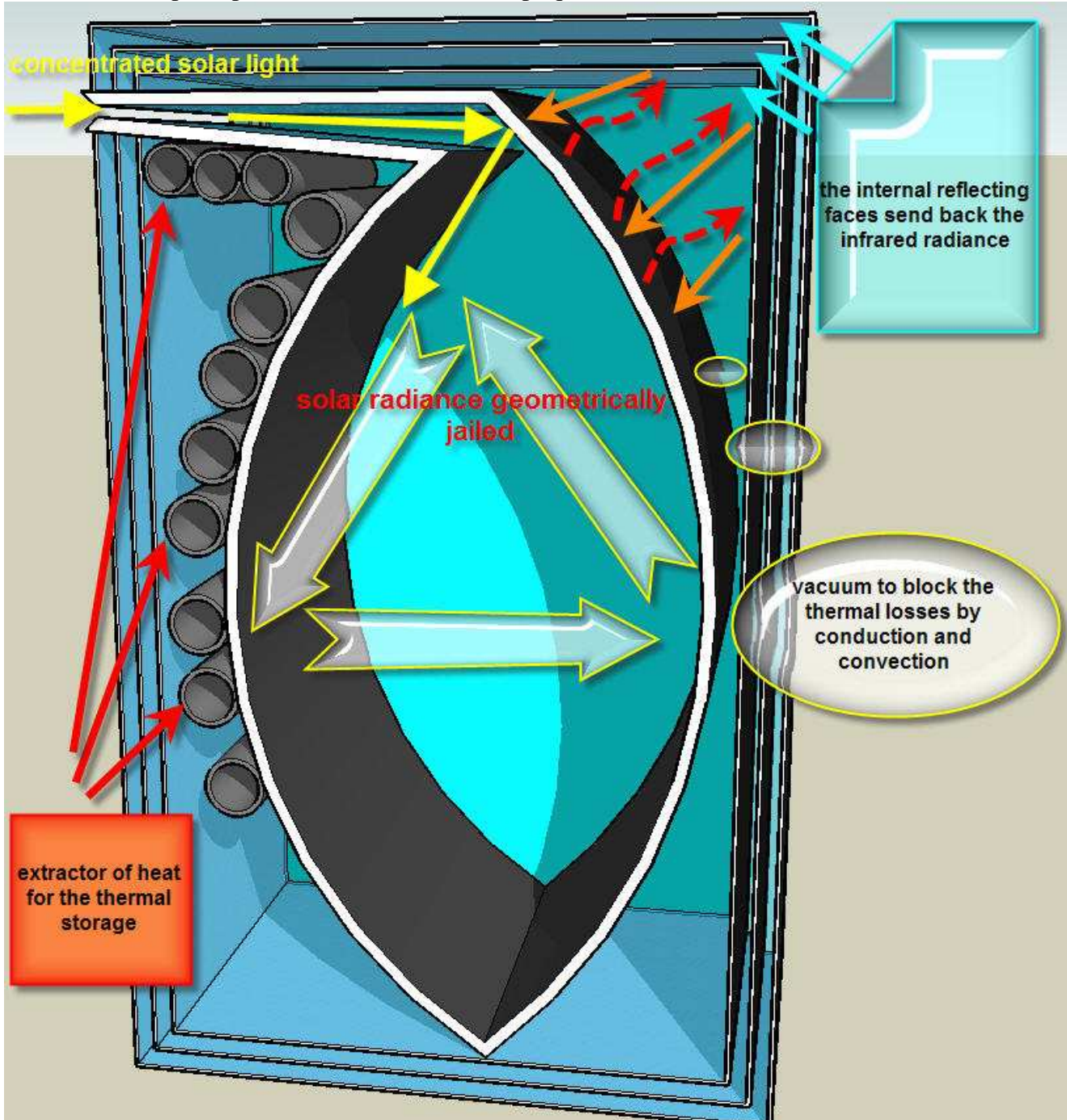


image aimablement créée par **JMB** alias toto65, forumer sur www.econologie.com

Plus de détails sur :

http://sycomoreen.free.fr/syco_francais/solaire_thermoelec.html

Exclusive intellectual property of SYCOMOREEN,
authorized reproduction solely for non-profit scientific research or educational and school applications

SOMMAIRE

1. Dimensions.....	3
1.1. Dimensions du miroir collecteur et rendements	3
I.1.a) Envergure et rendement géométrique.....	3
I.1.b) Distance focale du miroir et rendement réflexif.....	3
I.1.c) Diamètre de la tâche solaire sur le plan focal.....	4
1.2. Dimensions de l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE).....	4
I.2.a) Dimensions de l'entrée de ECE.....	4
I.2.b) Autres dimensions	5
2. Puissances entrantes et sortantes	5
2.1. Puissance entrante	5
2.2. Puissances sortantes	5
2.2.a) Puissances de conduction thermique	5
2.2.b) Puissances de rayonnement thermique	6
3. Rendements du Piège hyperthermique du rayonnement solaire direct (PHRSD).....	7
3.1. Rendement de piégeage thermique	7
3.1.a) Expression.....	7
3.1.b) Optimisation du rendement de piégeage thermique	8
3.1.c) Simulations	8
3.2. Rendement de la machine thermoélectrique	9
3.2.a) Aspect thermodynamique	9
3.2.b) Rendement électrique.....	9
3.3. Rendement global thermoélectrique	10
3.3.a) Expression mathématique	10
3.3.b) Simulations	10
Conclusion	12
ANNEXE 1 : Facteurs transmissifs du rayonnement thermique pour les 4 tôles d'isolation....	13
ANNEXE 2 : Emissivités de quelques matériaux et états de surfaces.....	17

1. Dimensions

1.1. Dimensions du miroir collecteur et rendements

I.1.a) Envergure et rendement géométrique

Le miroir collecteur est une surface parabolique de section ronde ou carrée dont l'envergure est de l'ordre du mètre. Nous choisissons ici une envergure $e_{vg} = 2 \text{ m}$ à section carrée.

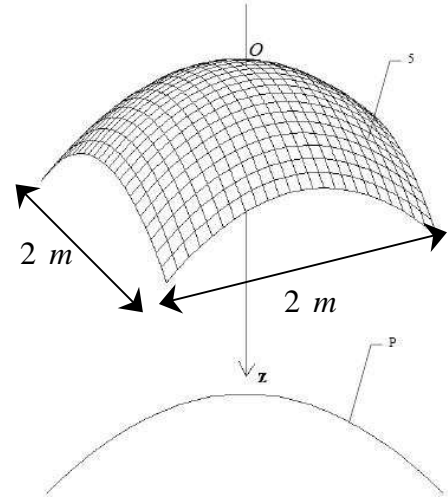
La surface collectrice est donc $S_C = e_{vg}^2 = 4 \text{ m}^2$

Toutefois, l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE) et ses barres porteuses représentent un disque d'ombre de diamètre 30 cm. Ce diamètre porte une ombre sur le miroir collecteur dont le rayon de masquage est $r_m = 0,15 \text{ m}$. La surface collectrice effective vaut donc :

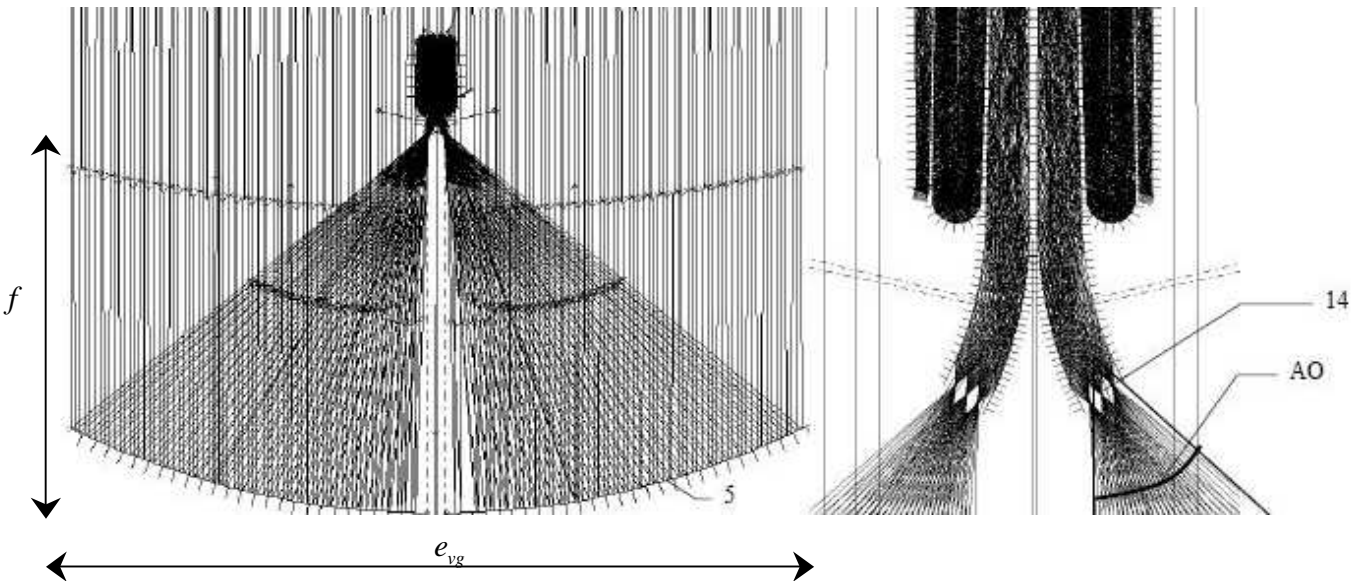
$$S_{Ce} = e_{vg}^2 - \pi r_m^2 = 3,93 \text{ m}^2$$

Il se dégage ici un premier *rendement géométrique* :

$$\eta_{géo} = \frac{S_{Ce}}{S_C} = \frac{e_{vg}^2 - \pi r_m^2}{e_{vg}^2} = 1 - \frac{\pi r_m^2}{e_{vg}^2} = 98,23\%$$



I.1.b) Distance focale du miroir et rendement réflexif



Afin de garantir une bonne pénétration dans l'ouverture de l'enceinte de confinement de l'énergie, l'angle d'ouverture AO des rayons focalisés doit être inférieur ou égal à 50° . L'équation d'une parabole est caractérisé par un paramètre p tel qu'en appelant

- z distance axiale relative au centre du miroir
- r distance radiale relative au centre du miroir

l'équation s'écrit $z = \frac{r^2}{2p}$

La distance focale f de la parabole s'exprime par $f = \frac{p}{2}$, si bien que $z = \frac{r^2}{4f}$

On peut alors exprimer le rayon maximal du miroir correspondant à la distance de son centre à l'un

des 4 sommets : $r_{\max} = \frac{e_{vg} \sqrt{2}}{2}$ Puis $\tan AO = \frac{r_{\max}}{f - \frac{r_{\max}^2}{4f}} = \frac{1}{\frac{f}{r_{\max}} - \frac{r_{\max}}{4f}}$

En posant $X = \frac{f}{r_{\max}}$ le rapport traduisant les proportions géométriques de la parabole :

$$\tan AO = \frac{1}{X - \frac{1}{4X}}$$

La résolution de l'équation $AO \leq 50^\circ$ conduit à la condition : $X \geq 1,072$

$$\text{Soit } f \geq 1,072 \frac{e_{vg} \sqrt{2}}{2} = 0,758 e_{vg}$$

Nous choisirons donc des paraboles de rapport f / e_{vg} de l'ordre de 0,76.

Pour une envergure de 2000 mm, une focale $f = 1600 \text{ mm}$ convient et donne $AO = 47,68^\circ$.

Le rendement réflexif du miroir η_{rm} dépend de sa matière et de son état de surface qui doit être le plus lisse possible. Des miroirs argentés atteignent 95% de rendement réflexif, d'autres en aluminium 90%. Nous retenons pour l'étude :

$$\eta_{rm} = 90\%$$

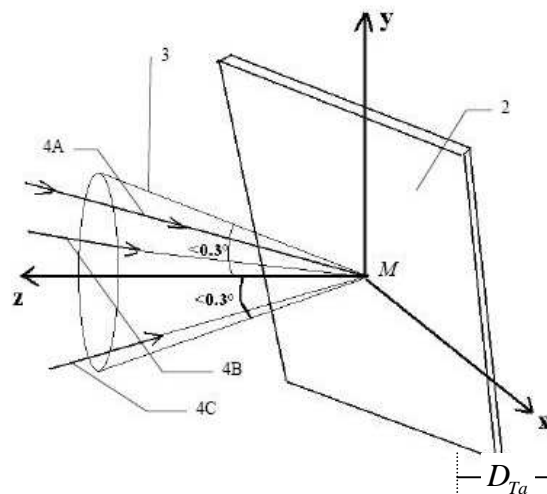
I.1.c) Diamètre de la tâche solaire sur le plan focal

Le diamètre D_{Ta} théorique de cette tâche est important car c'est la plus petite ouverture envisageable pour l'entrée de l'enceinte de confinement de l'énergie. Le soleil est vu sous un diamètre angulaire $DA = 0,52^\circ$ depuis la Terre tel que :

$$D_{Ta}^{théo} = f \tan DA$$

Compte tenu des légères diffusions/réfractions inhomogènes au niveau de l'atmosphère, une valeur $DA = 0,6^\circ$ est plus pertinente, et dans ce cas ($f = 1600 \text{ mm}$) :

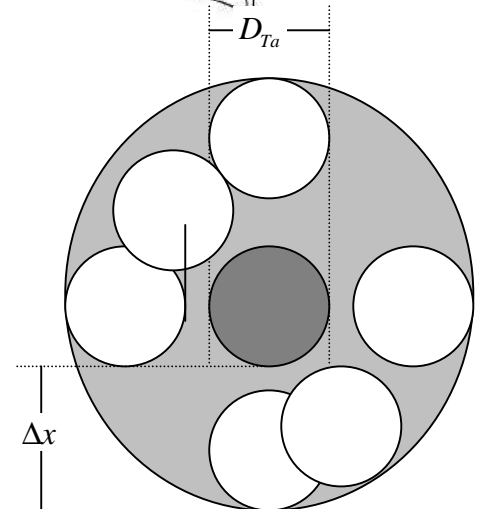
$$D_{Ta}^{théo} = 1600 \tan 0,6 = 16,75 \text{ mm}$$



I.2. Dimensions de l'enceinte de confinement de l'énergie (ECE)

I.2.a) Dimensions de l'entrée de ECE

Les technologies actuelles élaborées (pointé d'étoiles à but spectrographique, de satellites de télécommunication) atteignent des angles d'imprécision de pointé de $\alpha_i \approx \pm 0,1^\circ$. Des imprécisions plus grandes (1°) peuvent être corrigées par un cône de verre à l'entrée amenant sans pertes les rayons dans le trou par réflexion totale. Sur la figure ci-contre, le disque sombre central représente l'emplacement de la tâche solaire dans l'hypothèse d'un pointage parfait. Les disques blancs représentent la tâche solaire lorsque le pointage est imprécis. Δx est la translation correspondant à une erreur de pointé $|\alpha_i| = 0,1^\circ$.



Ainsi, la distance vaut : $\Delta x \approx f \tan 0,1^\circ = 2,79 \text{ mm}$

Pour être sûr que tous les rayons focalisés s'engouffrent dans la cavité, son diamètre D_e doit être :

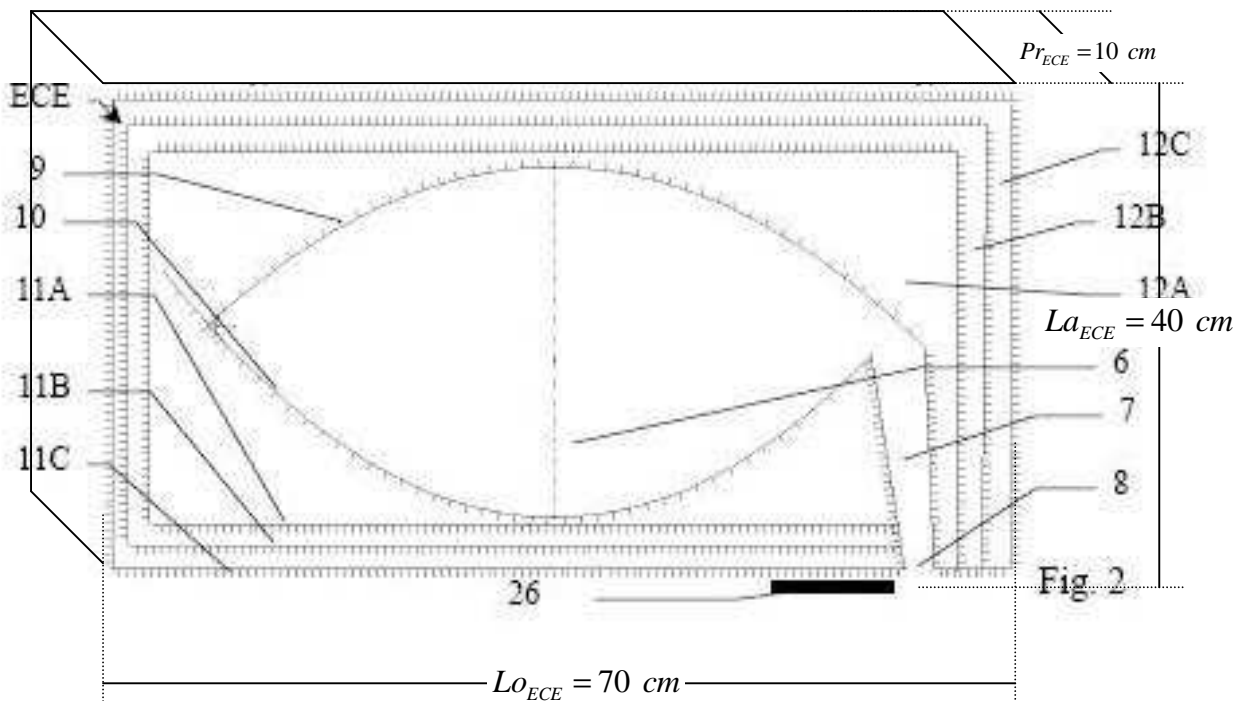
$$D_e = D_{Ta}^{Théo} + 2\Delta x = f (\tan DA + 2 \tan \alpha_i) = 22,34 \text{ mm}$$

Le rayon de l'entrée de la cavité vaut ainsi : $r_e = D_e / 2 = 11,17 \text{ mm}$

Ceci veut dire aussi que la surface émissive offerte au rayonnement de la cavité vaut :

$$S_e = \pi r_e^2 = 392 \text{ mm}^2 = 3,92 \text{ cm}^2$$

I.2.b) Autres dimensions



La face qui génère l'ombre est celle du dessus, de surface 700 cm^2 légèrement inférieure à πr_m^2 .
Entrée de Diamètre D_e , Petite focale : 125 mm , Longue focale : 150 mm , Distance cavité : 550 mm .

2. Puissances entrantes et sortantes

2.1. Puissance entrante

C'est l'énergie réfléchiée vers l'entrée de ECE par le miroir collecteur. On appelle ϕ le flux solaire surfacique incident (en W/m^2). Par une très belle journée sans nuages, $\phi \approx 1200 \text{ W}/\text{m}^2$ en France (et encore plus dans les régions plus au Sud).

La puissance solaire incidente P_{inc} s'exprime par $P_{inc} = \phi S_C$; dans notre cas, $P_{inc} = 4800 \text{ W}$

La puissance incidente entrante P_{ie} s'exprime par : $P_{ie} = \eta_{géo} \eta_{rm} P_i = 4338 \text{ W}$. **Elle est quasiment totalement absorbée sur les parois de la cavité afocale** car chaque rayon y entrant subit en moyenne 40 réflexions lui prélevant à chaque fois 20% de son énergie : $0,8^{40} = 0,013 \%$, soit au bout de 40 réflexions seulement $0,6 \text{ W}$ non absorbé (très négligeable devant 4338 W).

2.2. Puissances sortantes

Les puissances sortantes sont dues aux pertes par conduction et rayonnement thermiques. Nous supposons que le PHRSD est en régime nominal, c'est à dire en régime *stationnaire*.

2.2.a) Puissances de conduction thermique

La conduction thermique se fait sur 2 zones différentes :

- les pertes par conduction à travers l'entrée de ECE : P_{sce}
- les pertes par conduction à travers les tôles d'isolation séparées par du vide : P_{sct}

Estimation des pertes de conduction par l'entrée de ECE

La conductivité thermique de l'air λ_{air}^{atm} à la pression atmosphérique vaut : $\lambda_{air}^{atm} = 0,0262 \text{ W / m / K}$.

On assimile l'entrée de ECE à un cylindre de longueur $L_{ce} \approx 25 \text{ cm}$ de section $S = 1,5S_e = 5,88 \text{ cm}^2$. Cette majoration par un facteur 1,5 modélise le caractère évasé du couloir anti-retour suivi de la cavité afocale bi-concave de température T à peu près homogène. On pose T_{ext} la température extérieure de l'atmosphère. Usuellement $T_{ext} = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$.

On montre en diffusion thermique que la résistance thermique du cylindre d'entrée vaut : $R_{th}^{ce} = \frac{L_{ce}}{\lambda_{air}^{atm} S}$

Et la puissance thermique perdue en régime stationnaire vaut : $P_{sce} = \frac{T - T_{ext}}{R_{th}^{ce}}$

En ordres de grandeur :

$$R_{th}^{ce} \approx 16228 \text{ K / W} ; \text{ et si } T - T_{ext} \approx 1200\text{K} , P_{sce} = 0,074 \text{ W}$$

(extrêmement faible devant les 4800 W incidents !)

Estimation des pertes de conduction à travers les tôles

Une estimation basse de l'épaisseur moyenne d'air raréfié autour de la cavité afocale bi-concave est :

$$e_{air} \approx 8 \text{ cm}$$

Une estimation haute de la surface d'interface avec l'atmosphère est :

$$S_{atm} = 2(L_{o_{ECE}}La_{ECE} + Lo_{ECE}Pr_{ECE} + La_{ECE}Pr_{ECE}) = 7800 \text{ cm}^2$$

On suppose que l'air a été suffisamment raréfié pour que $\lambda_{air}^{iso} = \lambda_{air} / 4$

4 enceintes d'acier viennent aussi ralentir cette diffusion (mais faiblement). On pose la conductivité thermique de l'acier $\lambda_{acier} = 50 \text{ W / m / K}$ et la surface des tôles $S_{acier} \approx S_{atm}$, toutes supposées égales (hypothèse défavorable), et l'épaisseur des tôles $e_{acier} = 5 \text{ mm}$.

La résistance thermique de ECE vaut $R_{th}^{ECE} \approx \frac{e_{air}}{\lambda_{air}^{iso} S_{atm}} + 4 \frac{e_{acier}}{\lambda_{air}^{iso} S_{atm}}$

Et la puissance thermique perdue en régime stationnaire vaut : $P_{sct} = \frac{T - T_{ext}}{R_{th}^{ECE}}$

En ordres de grandeur : $S_{acier} \approx S_{atm} = 7800 \text{ cm}^2$

$$R_{th}^{ECE} \approx 15.66 \text{ K / W} ; \text{ et si } T - T_{ext} \approx 1200\text{K} , P_{sct} = 76.63 \text{ W}$$

Puissance également faible devant la puissance incidente.

2.2.b) Puissances de rayonnement thermique

Le rayonnement thermique se fait sur 2 zones différentes :

- les pertes par rayonnement à travers l'entrée de ECE : P_{sre}
- les pertes par rayonnement à travers les tôles d'isolation séparées par du vide : P_{srt}

Preliminaire ; notion d'émissivité

L'émissivité ε est un facteur multiplicatif de la puissance émise par un corps noir : $p_{CN} = \sigma T^4 \text{ W/m}^2$

Si bien que pour un corps quelconque de température T et d'émissivité ε , la puissance radiative réelle p réémise s'écrit :

$$p = \varepsilon \sigma T^4 \text{ en W/m}^2 \text{ avec } \sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W / m}^2 / \text{K}^4 \text{ la constante de Stefan Boltzmann.}$$

Pour l'acier poli, $\varepsilon = 0,07$ à $0,20$. Nous retiendrons $\varepsilon_1 = 0,20$ (le plus défavorable) pour l'acier subissant la très haute température, et $\varepsilon_2 = 0,1$ pour l'acier réfléchissant des tôles de confinement.

Estimation des pertes de rayonnement thermique à travers l'entrée de ECE

L'entrée a une surface S_e qui rayonne à la température T : $P_{sre} = \varepsilon_1 S_e \sigma T^4$

Ordre de grandeur à 1200 K : 9,21 W (très faible)

Estimation des pertes de rayonnement thermique à travers les tôles d'isolation

Elle nécessite une modélisation et des calculs assez complexes détaillés dans l'annexe 1. Il en ressort :

$$P_{srt} = S_{acier} \sigma (F_S T^4 - F_E T_{ext}^4) \text{ avec :}$$

- $F_S = 9.10^{-5}$ le facteur transmissif sortant du rayonnement (calculé pour 4 tôles)
- $F_E = 0,368$ le facteur transmissif entrant du rayonnement solaire **diffus**. Les 4 tôles génèrent un léger effet de serre par absorption du rayonnement diffus qui fait augmenter le rendement de piégeage thermique de quelques % (au dessus de $\eta_{geo} \eta_{rm}$), particulièrement à la température ambiante.

3. Rendements du Piège hyperthermique du rayonnement solaire direct (PHRSD)

3.1. Rendement de piégeage thermique

C'est le rapport η_{th} entre le rayonnement incident sur le collecteur et l'énergie retenue dans la cavité de confinement :

$$\eta_{th} = \frac{P_{ie} - P_{sce} - P_{sct} - P_{srt} - P_{sre}}{P_{inc}}$$

3.1.a) Expression

Tout calcul fait et par rapport aux paramètres déjà introduits :

$$\eta_{th} = \eta_{geo} \eta_{rm} - \frac{S_{atm} \sigma (F_S T^4 - F_E T_{ext}^4) + \varepsilon_1 \sigma T^4 S_e + (T - T_{ext}) \left[\frac{S_{atm}}{\frac{k_{iso} e_{air}}{\lambda_{air}^{atm}} + 4 \frac{e_{acier}}{k_r \lambda_{acier}}} + \frac{k_S \lambda_{air}^{atm} S_e}{L_{ce}} \right]}{S_C \phi}$$

avec dans le « cas médian » (Cf. simulations 3.1.c et 3.3.b):

$$S_C = e_{vg}^2 \quad ; \quad \eta_{geo} = 1 - \frac{\pi r_m^2}{e_{vg}^2} \approx 98,23\% \quad ; \quad S_e = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad ; \quad D_e = f (\tan DA + 2 \tan \alpha_i)$$

$$DA = 0,6^\circ \quad ; \quad f = 1600 \text{ mm} \quad ; \quad k_{iso} = 4 \quad ; \quad k_r = 1 \quad ; \quad k_S = 1,5 \quad ; \quad \eta_{rm} \approx 90\%$$

$$F_S = T_{4S} = T_{2S}^2 \frac{1}{1 - R_{2S} R_{2E}} \text{ avec } R_{2S} = 1 - \frac{T_A^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)} \text{ et } T_{2S} = \frac{T_A^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)}$$

$$F_E = T_{4E} = T_{2E}^2 \frac{1}{1 - R_{2S} R_{2E}} \text{ avec } R_{2E} = 1 - \frac{T_N^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)} \text{ et } T_{2E} = \frac{T_N^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)}$$

Principaux paramètres-pilotes du modèle :

- e_{vg} : envergure du miroir
- r_m : rayon d'un disque équivalent à l'ombre portée par ECE sur le miroir collecteur
- ϕ : flux solaire incident
- α_i : imprécision de pointé du soleil
- RA, TA, RN, TN : coefficients de réflexion/absorption de l'acier poli (A) / brut (N)

3.1.b) Optimisation du rendement de piégeage thermique

Le rendement est optimisé principalement lorsque :

- la surface collectrice est grande
- le flux incident est grand
- la surface extérieure de ECE en contact avec l'atmosphère est petite
- F_E est grand et surtout F_S est petit

Le rendement dépend de la température et *s'effondre si la température augmente trop* (influence des facteurs $T-T_{ext}$ et **surtout** T^4 respectivement rattachés à la conduction et au rayonnement thermiques).

3.1.c) Simulations

3 cas vont être présentés : défavorable, médian et favorable

1. Cas défavorable

Température extérieure 20°C

L'air d'isolation **n'est pas** dépressurisé $k_{iso}=1$

La réflexion sur le miroir collecteur vaut 85%

L'imprécision de pointé solaire vaut 2°

Le flux solaire n'est pas maximum : 900 W/m²

Aciers poli et brut usuels

$RA=0.9$; $TA=0.1$; $RN=0.2$; $TN=0.8$

Les résultats sont :

Rendement de piégeage thermique :

- à 20° : 86,8%
- à 1000°C : 68,8%
- température d'équilibre (piégeage nul)
 - o 2051 K (1778°C)

2. Cas médian

Température extérieure 20°C

L'air d'isolation **partiellement** dépressurisé $k_{iso}=4$

La réflexion sur le miroir collecteur vaut 90%

L'imprécision de pointé solaire vaut 1°

Le flux solaire est bon : 1200 W/m²

Aciers poli et brut usuels

$RA=0.9$; $TA=0.1$; $RN=0.2$; $TN=0.8$

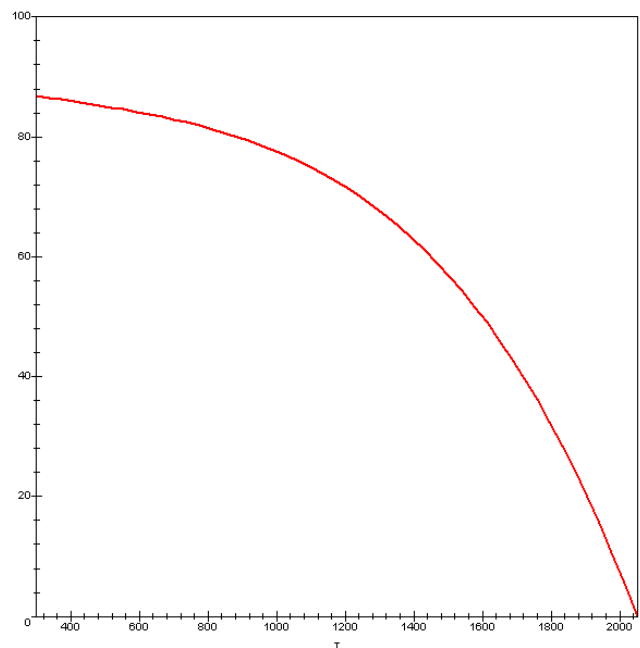
Les résultats sont :

Rendement de piégeage thermique :

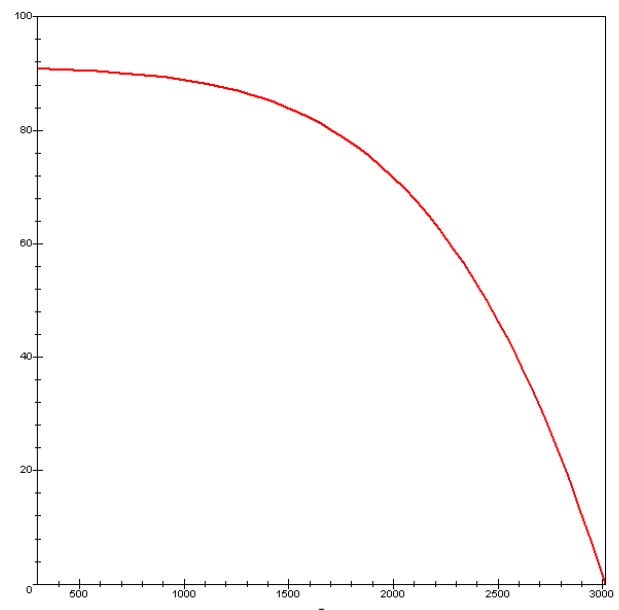
- à 20° : 90,9%
- à 1000°C : 86,8%
- température d'équilibre (piégeage nul)
 - o 3011,3 K (2738°C)

N.B. le piège en acier supportera jusqu'à 1200°C, au delà, il faut utiliser un métal « réfractaire »

rendement (%) de piégeage thermique en fonction de T (Kelvin) dans la cavité



rendement (%) de piégeage thermique en fonction de T (Kelvin) dans la cavité



3. Cas favorable

Température extérieure 20°C

L'air d'isolation **excellamment**
dépressurisé $k_{iso}=100$

La réflexion sur le miroir collecteur vaut
95%

L'imprécision de pointé solaire vaut 0.1°

Le flux solaire est très bon : 1500 W/m²

Métal très bien poli, face noire et brute

$RA=0.93$; $TA=0.07$; $RN=0.05$; $TN=0.95$

Les résultats sont :

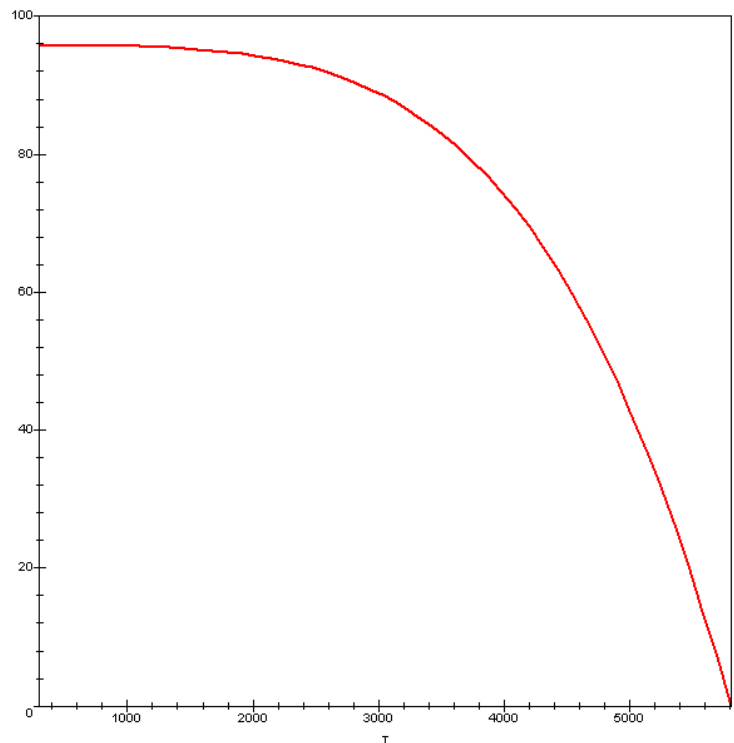
Rendement de piégeage thermique :

- à 20° : 95,8%
- à 1000°C : 95,5%
- température d'équilibre (piégeage nul)
 - o 5807,7 K (5534.7°C)

N.B. température trop élevée. Mais il est possible de se limiter à 1000°C ou 2000°C et de bénéficier de l'excellent rendement de piégeage thermique. **Les caractéristiques**

requisés sont d'ores et déjà atteignables dans le cadre d'une réalisation soignée en milieu désertique.

rendement (%) de piégeage thermique en fonction de T (Kelvin) dans la cavité



3.2. Rendement de la machine thermoélectrique

La machine thermoélectrique comprend une machine thermodynamique, une génératrice et un convertisseur d'injection sur le réseau électrique.

3.2.a) Aspect thermodynamique

Le cycle envisagé est un cycle de Stirling refroidi à la température extérieure T_{ext} et chauffé par le piège hyperthermique de température T . Son rendement théorique est celui de Carnot :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{ext}}{T}$$

Toutefois, le cycle peut se faire avec certaines irréversibilités (mécanique, laminage de fluide...) et fuites thermiques que nous modélisons par l'introduction d'un rendement d'irréversibilités $\eta_{irr\acute{e}v}$, et finalement, le rendement thermodynamique global s'écrit :

$$\eta_{thermo} = \eta_{irr\acute{e}v} \eta_C = \eta_{irr\acute{e}v} \left(1 - \frac{T_{ext}}{T} \right)$$

3.2.b Rendement électrique

Le rendement électrique $\eta_{\acute{e}lec}$ est le produit du rendement de la génératrice $\eta_{g\acute{e}n\acute{e}}$ et du rendement du convertisseur d'injection sur le réseau η_{conv} . Finalement :

$$\eta_{\acute{e}lec} = \eta_{g\acute{e}n\acute{e}} \eta_{conv}$$

3.3. Rendement global thermoélectrique

3.3.a) Expression mathématique

On pose η_{global} le rendement solaro-électrique global. C'est le produit du rendement thermoélectrique $\eta_{thermoélec} = \eta_{thermo} \eta_{élec}$ par le rendement de piégeage thermique η_{th} . On a donc :

$$\eta_{global} = \eta_{thermoélec} \eta_{th} = \eta_{thermo} \eta_{élec} \eta_{th}$$

Mais encore avec le 3.1.a) :

$$\eta_{global} = \left(1 - \frac{T_{ext}}{T}\right) \eta_{irr\acute{e}v} \eta_{g\acute{e}n\acute{e}} \eta_{conv} \eta_{geo} \eta_{rm} \frac{S_{atm} \sigma (F_S T^4 - F_E T_{ext}^4) + \varepsilon_1 \sigma T^4 S_e + (T - T_{ext}) \left[\frac{S_{atm}}{\frac{k_{iso} e_{air}}{\lambda_{air}^{am}} + 4 \frac{e_{acier}}{k_r \lambda_{acier}}} + \frac{k_S \lambda_{air}^{am} S_e}{L_{ce}} \right]}{S_C \phi}$$

3.3.b) Simulations

Une chose très importante à remarquer est que le comportement des rendements thermodynamique η_{thermo} et de piégeage thermique η_{th} sont **opposés** :

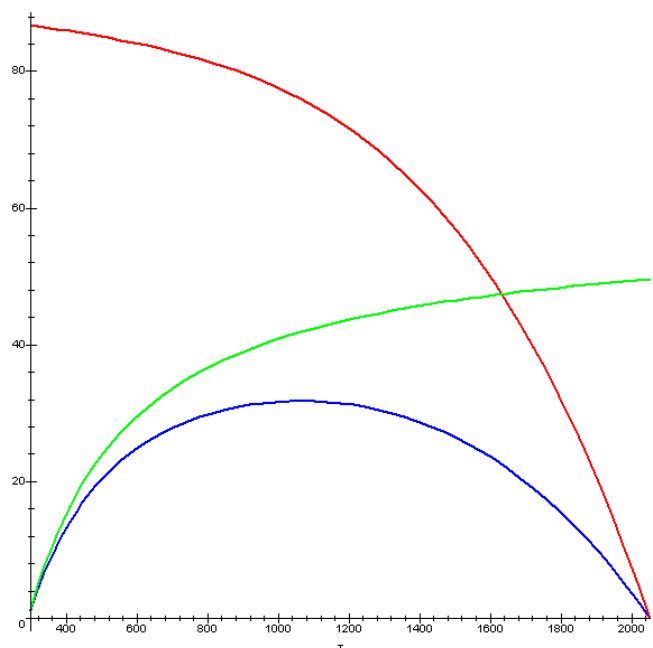
- à basse température, η_{thermo} est faible et est η_{th} grand
- à haute température, η_{th} est faible et est η_{thermo} grand

Comme le rendement thermoélectrique global est proportionnel au produit $\eta_{th} \eta_{thermo}$, une température optimale T_{opt} va se dégager pour laquelle le rendement atteindra son maximum. Cette température est optimale dans le sens où elle réalise le meilleur compromis de température dans l'objectif de produire du travail mécanique, et donc éventuellement de l'électricité.

Nous allons simuler à nouveau 3 cas, défavorable, médian et favorable, **reprenant respectivement les 3 cas déjà présentés sur le piégeage thermique**. Sur les graphiques suivants :

- la courbe verte représente le rendement thermoélectrique $\eta_{thermoélec} = \eta_{thermo} \eta_{élec}$
- la courbe rouge représente le rendement de piégeage thermique η_{th}
- la courbe bleue représente le rendement solaro-électrique global η_{global}

rendement % global solaire => elec en fonction de la température de la cavité (Kelvin)



Cas défavorable :

Il est représenté sur la courbe précédente. La machine thermodynamique présente 20% d'irréversibilité, soit $\eta_{\text{irr}\acute{e}v} = 80\%$. La génératrice électrique a un rendement $\eta_{\text{g}\acute{e}n\acute{e}} = 85\%$. Le convertisseur électrique d'injection est assez dissipatif : $\eta_{\text{irr}\acute{e}v} = 80\%$

Le calcul montre un rendement maximum de 30,8% à la température de 1062 K, soit $T_{\text{opt}} = 789^{\circ}\text{C}$.

Ainsi, avec un matériel de qualité très moyenne, on atteint les rendements des meilleures centrales hélioélectriques actuelles à concentration. Signalons que cette performance représente 3 fois celle du photovoltaïque avec possibilité de cogénération chauffage/électricité.

Cas médian :

Le matériel est de qualité convenable : la machine thermodynamique présente 15% d'irréversibilité, soit $\eta_{\text{irr}\acute{e}v} = 85\%$. La génératrice électrique a un rendement $\eta_{\text{g}\acute{e}n\acute{e}} = 90\%$. Le convertisseur électrique d'injection est assez peu dissipatif : $\eta_{\text{conv}} = 90\%$

Le calcul montre un rendement maximum de 46,5% à la température optimale de 1457, soit $T_{\text{opt}} = 1184^{\circ}$.

Cette performance est parfaitement accessible avec le matériel « du commerce » et un piège en acier. Elle représente une progression de 50% par rapport aux performances des centrales actuelles.

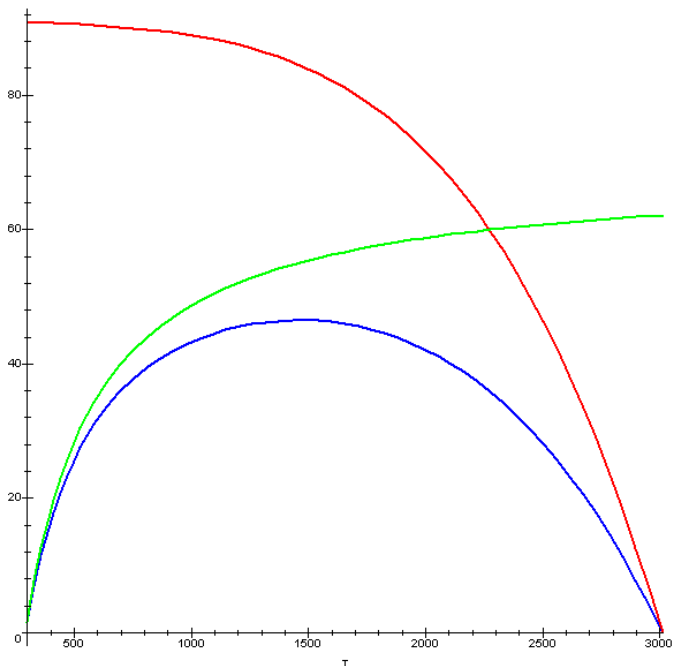
Cas favorable :

Le matériel est de qualité supérieure : la machine thermodynamique présente 10% d'irréversibilité, soit $\eta_{\text{irr}\acute{e}v} = 90\%$. La génératrice électrique a un rendement $\eta_{\text{g}\acute{e}n\acute{e}} = 95\%$. Le convertisseur électrique d'injection est très peu dissipatif : $\eta_{\text{conv}} = 95\%$. Le piège utilise un métal réfractaire.

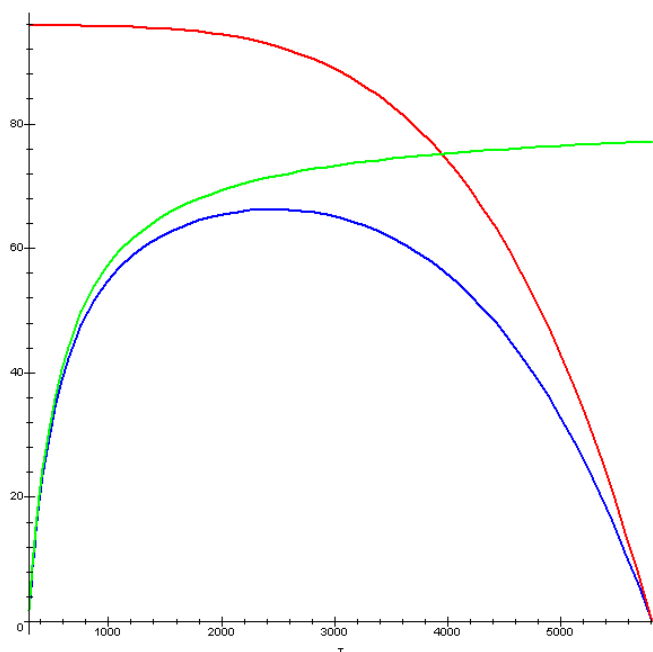
Le calcul montre un rendement maximum de 66,2% à la température optimale de 2464K, soit $T_{\text{opt}} = 1991^{\circ}\text{C}$. C'est le double de l'état de l'art actuel !

Cette performance exceptionnelle est accessible en utilisant les meilleurs savoir-faire connus dans les différents domaines requis par le PHRSO.

rendement % global solaire => elec en fonction de la température de la cavité (Kelvin)



rendement % global solaire => elec en fonction de la température de la cavité (Kelvin)



Conclusion

Cette étude a montré *les très hauts rendements thermiques et solaroélectriques* rendus possibles par le nouveau concept PHRSD : par un confinement géométrique et thermique de l'énergie solaire directe, *le PHRSD est la seule machine capable d'atteindre un rendement de piégeage thermique de plus de 90% à plus de 1000°C*. Ceci lui permet de fournir une énergie thermique de grande qualité, débouchant sur des applications de *thermolyses*, de *réacteur chimique écologique* (pour réaction à cinétique lente ou endothermique), et surtout de *production de travail mécanique* : dans ce dernier cas, *le cycle thermodynamique* dispose d'une source extrêmement chaude et peut donc atteindre *des rendements thermodynamiques bien au-delà de 50%*.

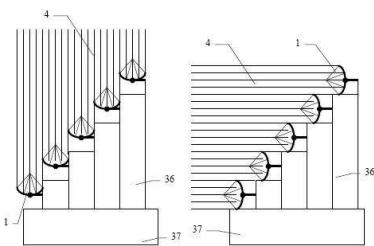
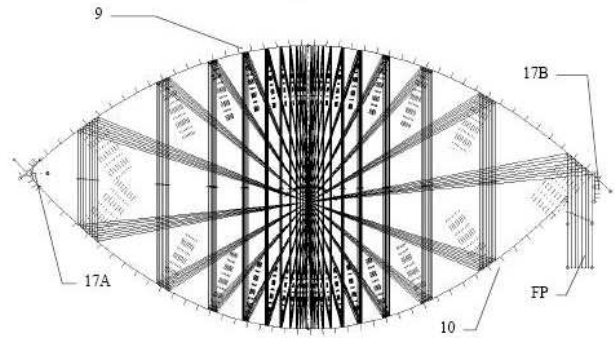


Fig. 15B

Fig. 15C

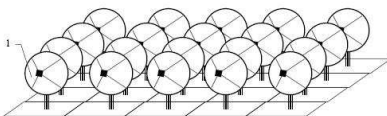
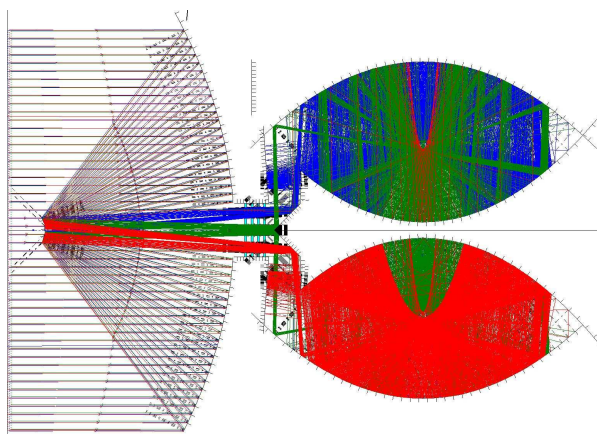


Fig. 15D

Ainsi, le PHRSD, sans nécessiter de matériaux ou savoir-faire inconnus, optimise presque tous les maillons de la chaîne énergétique du soleil vers le réseau électrique : concentration de la lumière solaire, confinement géométrique, blocage de la conduction et du rayonnement thermiques, et enfin, cycles thermodynamiques de haute efficacité, notamment cycles à vapeur surchauffée, Brayton-Joule, mais aussi et surtout de *Stirling ou Ericsson*, les plus adaptés pour tendre vers la limite de Carnot.

Il peut atteindre des rendements solaro-électriques jusqu'à 65% avec une réalisation très soignée, et 50% avec une construction de qualité normale, ce qui rend *le PHRSD deux fois plus puissant qu'une centrale à technologie Dish/Stirling ou cylindro-parabolique/vapeur intrinsèquement incapables de faire progresser leurs efficacités dans de telles proportions sans être optimisées par un PHRSD*.

Sans aucun doute, *le PHRSD peut apporter dans le mix électrique une contribution massive et inépuisable d'énergie renouvelable*, aussi bien centralisée que décentralisée. Mais plus encore, *le PHRSD pourrait peut-être devenir la technologie permettant la diffusion massive de nouveaux vecteurs énergétiques qui ne sont propres qu'à la condition de fournir une énergie thermique et/ou électrique très importante et renouvelable* : ainsi l'hydrogène, les carburants issus de la biomasse par craquage thermique, liquéfaction (CTL,BTL...), ou par thermolyse, les métaux électropositifs producteurs d'hydrogène par contact avec l'eau (sodium, aluminium) ont peut-être trouvé là une source énergétique capable d'amorcer significativement leur développement.



En conclusion, *en s'appuyant sur la puissance et l'abondance de l'énergie solaire, et en exploitant des éléments parfaitement connus dans les domaines de la Physique et de la Technologie, le PHRSD est une solution avant-gardiste et viable à court-terme*. Seuls des partenariats industriels pourront révéler pleinement ses potentialités nombreuses et stratégiques à l'heure du réchauffement climatique et des dépendances énergétiques déjà bien trop fortes (gaz, pétrole...) qui vont s'intensifier dangereusement dans un avenir proche (peak-oil...).

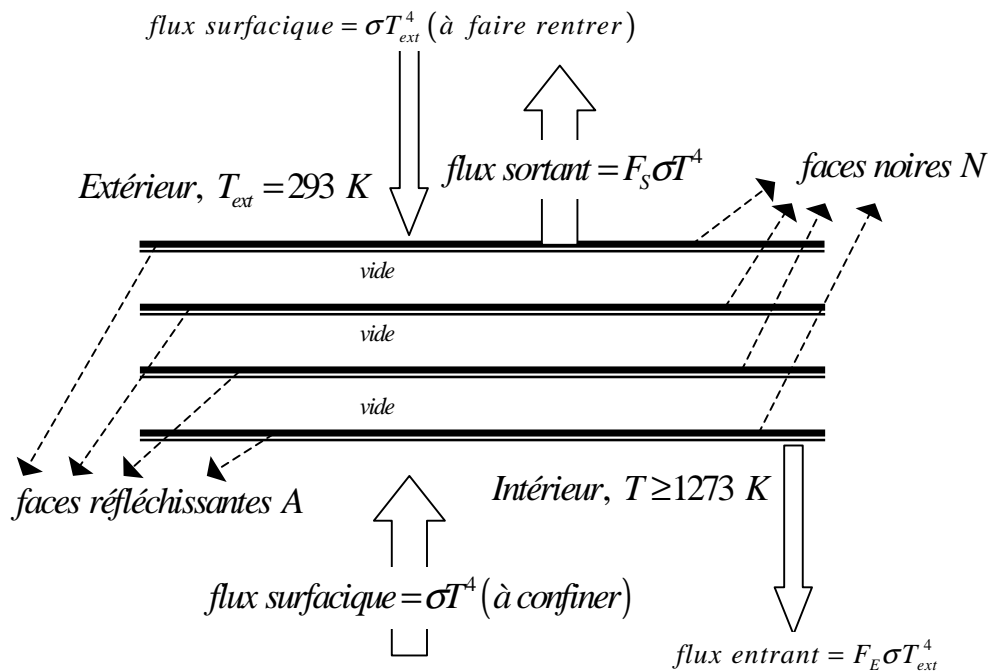
Précisions et contacts sur <http://sycomoreen.free.fr>

ANNEXE 1 : Facteurs transmissifs du rayonnement thermique pour les 4 tôles d'isolation

Modélisation

L'enceinte de confinement de l'énergie a une surface extérieure S_{acier} et ses pertes seront assimilées à celles traversant 4 tôles superposées et de surface S_{acier} . L'enjeu de cette étude est le calcul pour 4 tôles de :

- F_S le facteur transmissif sortant du rayonnement
- F_E le facteur transmissif entrant du **rayonnement diffus de l'atmosphère extérieure** (attention : aucun lien avec le rayonnement collecté par le miroir).



Les flux à confiner et à faire rentrer sont approximativement des rayonnements de corps noir. A 1000°C, soit 1273 K, la loi du déplacement de Wien nous indique les longueurs d'onde prépondérantes $\lambda_{pS}, \lambda_{pE}$ de ces rayonnements ;

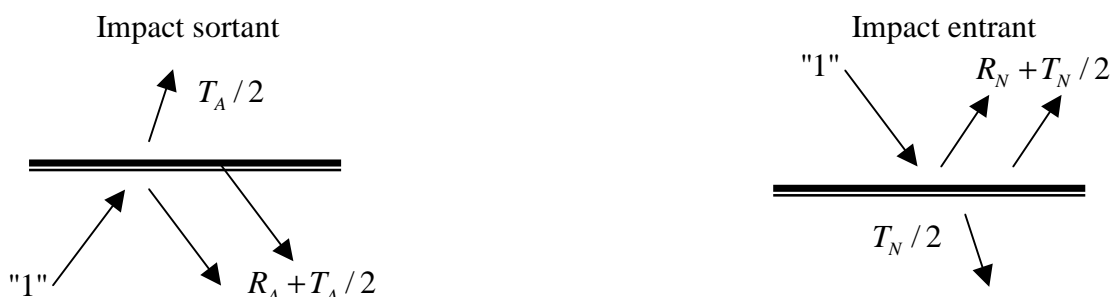
$$\lambda T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \Rightarrow \lambda_{pE} \approx \frac{2898}{1273} = 2,27 \mu\text{m} \text{ et } \lambda_{pS} \approx \frac{2898}{293} = 9,89 \mu\text{m}$$

Dans ces domaines de longueur d'onde correspondant aux *proches et lointains infrarouges* :

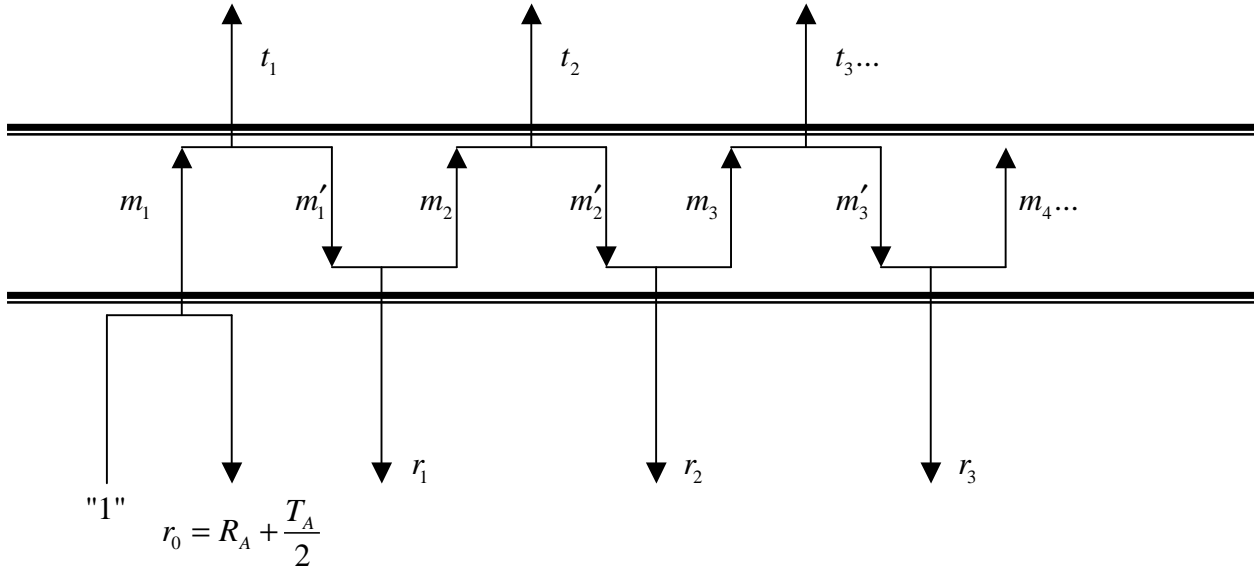
- les facteurs de réflexion/absorption en énergie d'une face brute en acier sont :
 $R_N = 0,2 ; T_N = 0,8$
- les facteurs de réflexion/(absorption → transmission) en énergie d'une face polie (ou « argentée »)

$$R_A = 0,9 ; T_A = 0,1$$

Le régime est supposé *stationnaire* ; donc les tôles ont une température stable et ne stockent pas le rayonnement absorbé. Nous supposons qu'elles le ré-émettent de manière égale sur leurs 2 faces. Le *bilan énergétique élémentaire* d'un impact sur une tôle est donc le suivant pour une « énergie unitaire » d'impact :



Les réflexions/absorptions/ré-émissions successives conduisent à la représentation schématique suivante :



Avec les suites, à partir de l'énergie unitaire « 1 » :

- m_n représentant la fraction d'énergie dans le sens sortant au bout du n-ième cycle
- m'_n représentant la fraction d'énergie dans le sens entrant au bout du n-ième cycle
- r_n représentant la fraction d'énergie confinée au bout du n-ième cycle
- t_n représentant la fraction d'énergie transmise au bout du n-ième cycle

Par rapport aux bilans énergétiques précédemment exposés, il se dégage les relations suivantes $\forall n > 1$:

$$t_n = \frac{T_A}{2} m_n \quad m'_n = \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right) m_n \quad r_n = \frac{T_N}{2} m'_n \quad m_{n+1} = \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) m'_n$$

Ces 4 relations donnent la relation de récurrence :

$$m_{n+1} = \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right) m_n$$

On pose $q = \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)$ la raison géométrique de cette suite :

Il vient immédiatement $m_n = q^{n-1} m_1$ avec $m_1 = \frac{T_A}{2}$

On peut alors poser et déduire T_{2S} le facteur de *transmission sortant* de 2 tôles :

$$T_{2S} = \sum_{k=1}^{\infty} t_k = \frac{T_A}{2} \sum_{k=1}^{\infty} m_k = \frac{T_A}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q^{k-1} m_1 = \frac{T_A^2}{4} \sum_{j=0}^{\infty} q^j = \frac{T_A^2}{4} \frac{1}{1-q}$$

Et finalement, $T_{2S} = \frac{T_A^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)}$ ordre de grandeur : $5,814 \cdot 10^{-3}$

On en déduit par conservation de l'énergie R_{2S} le facteur de *confinement sortant* de 2 tôles :

$$R_{2S} = 1 - T_{2S} = 1 - \frac{T_A^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_N + \frac{T_N}{2} \right) \left(R_A + \frac{T_A}{2} \right)}$$

ordre de grandeur : 0,9942

Soient maintenant :

(Suite annexe 1)

- T_{2E} le facteur de *transmission entrant* de 2 tôles :
- R_{2E} le facteur de *confinement entrant* de 2 tôles :

Ils se déduisent sans calcul supplémentaire par la permutation des indices N et A, d'où :

$$T_{2E} = \frac{T_N^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_A + \frac{T_A}{2}\right) \left(R_N + \frac{T_N}{2}\right)}$$

voisin de 0,372

$$R_{2E} = 1 - T_{2E} = 1 - \frac{T_N^2}{4} \frac{1}{1 - \left(R_A + \frac{T_A}{2}\right) \left(R_N + \frac{T_N}{2}\right)}$$

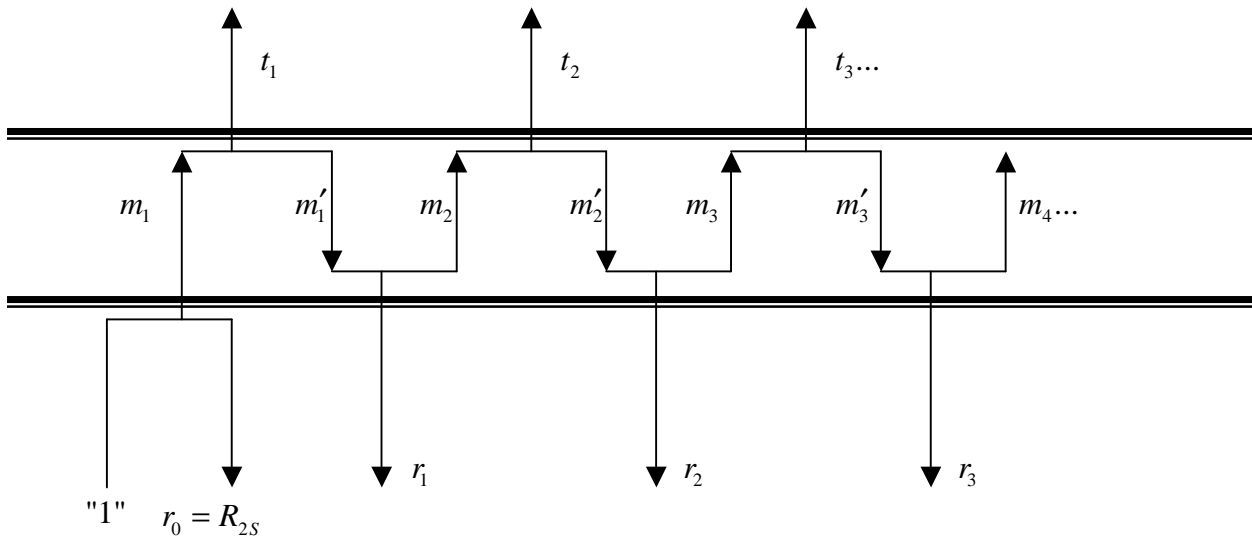
voisin de 0,628

Etude du cas de 4 tôles

Les 4 tôles se comportent comme 2 systèmes de 2 tôles superposés. Chaque système fonctionne pour un impact élémentaire :



Les réflexions/transmissions successives conduisent à la représentation schématique suivante :



Avec les suites, à partir de l'énergie unitaire « 1 » :

Avec les suites, à partir de l'énergie unitaire « 1 » :

- m_n représentant la fraction d'énergie dans le sens sortant au bout du n-ième cycle
- m'_n représentant la fraction d'énergie dans le sens entrant au bout du n-ième cycle
- r_n représentant la fraction d'énergie confinée au bout du n-ième cycle
- t_n représentant la fraction d'énergie transmise au bout du n-ième cycle

Par rapport aux impacts élémentaires précédents, il se dégage les relations suivantes $\forall n > 1$:

$$t_n = T_{2S} m_n \quad m'_n = R_{2S} m_n \quad r_n = T_{2E} m'_n \quad m_{n+1} = R_{2E} m'_n$$

Ces 4 relations donnent la relation de récurrence :

$$m_{n+1} = R_{2E} m'_n = R_{2E} R_{2S} m_n$$

On pose $Q = R_{2E} R_{2S}$ la raison géométrique de cette suite :

$$\text{Il vient immédiatement } m_n = Q^{n-1} m_1 \text{ avec } m_1 = T_{2S}$$

On peut alors poser et déduire T_{4S} le facteur de *transmission sortant* de 4 tôles :

$$T_{4S} = \sum_{k=1}^{\infty} t_k = T_{2S} \sum_{k=1}^{\infty} m_k = T_{2S} \sum_{k=1}^{\infty} Q^{k-1} m_1 = T_{2S}^2 \sum_{j=0}^{\infty} Q^j = T_{2S}^2 \frac{1}{1-Q}$$

Et finalement, $T_{4S} = T_{2S}^2 \frac{1}{1 - R_{2S} R_{2E}}$ ordre de grandeur : 9.10^{-5}

On en déduit par conservation de l'énergie R_{2S} le facteur de confinement sortant de 4 tôles :

$$R_{4S} = 1 - T_{4S} = 1 - T_{2S}^2 \frac{1}{1 - R_{2S} R_{2E}} \quad \text{ordre de grandeur : } 0,99991$$

Soient maintenant :

- T_{4E} le facteur de transmission entrant de 2 tôles :
- R_{4E} le facteur de confinement entrant de 2 tôles :

Ils se déduisent sans calcul supplémentaire par la permutation des indices S et E, d'où :

$$T_{4E} = T_{2E}^2 \frac{1}{1 - R_{2E} R_{2S}}$$

voisin de 0,368

$$R_{4E} = 1 - T_{4E} = 1 - T_{2E}^2 \frac{1}{1 - R_{2E} R_{2S}}$$

voisin de 0,631

Bilan de l'isolation à 4 tôles :

En permanence, les 4 tôles d'isolation, du point de vue de la cavité afocale biconcave:

- font perdre à la cavité : $T_{4S} \sigma T_{acier}^4 S$
- apportent à la cavité : $T_{4E} \sigma T_{ext}^4 S$

Finalement, on identifie donc sans peine :

$$F_{4S} = T_{4S} = 0,00009 \text{ et } F_E = T_{4E} = 0,368$$

ANNEXE 2 : Emissivités de quelques matériaux et états de surfaces

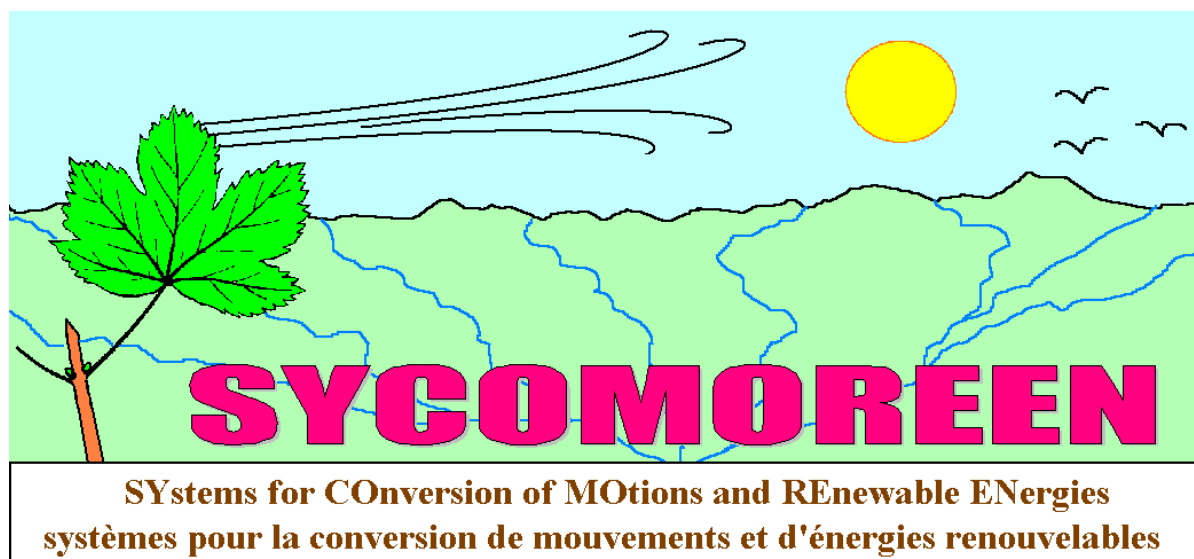
Source : Raytek Corporation 1999 – 2008, <http://www.raytek.fr/> mesure de températures sans contact par infrarouge

En tout rigueur, les émissivités dépendent de la longueur d'onde à laquelle on effectue la mesure.

Matériel	Émissivité ε avec $\phi_{emis} = \varepsilon_{\lambda} \sigma T^4$		
	1,0 μm	1,6 μm	8-14 μm
Aluminum			
non oxydé	0,1-0,2	0,02-0,2	n. d.
oxydé	0,4	0,4	0,2-0,4
Alliage A3003,			
oxydé	n. d.	0,4	0,3
rugueux	0,2-0,8	0,2-0,6	0,1-0,3
poli	0,1-0,2	0,02-0,1	n. d.
Plomb			
poli	0,35	0,05-0,2	n. d.
rugueux	0,65	0,6	0,4
oxydé	n. d.	0,3-0,7	0,2-0,6
Chrome	0,4	0,4	n. d.
Fer			
oxydé	0,4-0,8	0,5-0,9	0,5-0,9
non oxydé	0,35	0,1-0,3	n. d.
rouillé	n. d.	0,6-0,9	0,5-0,7
fondu	0,35	0,4-0,6	n. d.
Fer, versé			
oxydé	0,7-0,9	0,7-0,9	0,6-0,95
non oxydé	0,35	0,3	0,2
fondu	0,35	0,3-0,4	0,2-0,3
Fer, forgé			
mat	0,9	0,9	0,9
Gold	0,3	0,01-0,1	n. d.
Haynes			
Alliage	0,5-0,9	0,6-0,9	0,3-0,8
Inconel			
oxydé	0,4-0,9	0,6-0,9	0,7-,95
abrasé	0,3-0,4	0,3-0,6	0,3-0,6
Poli par électrolyse	0,2-0,5	0,25	0,15
Cuivre			
poli	n. d.	0,03	n. d.
rugueux	n. d.	0,05-0,2	n. d.
oxydé	0,2-0,8	0,2-0,9	0,4-0,8
Magnésium	0,3-0,8	0,05-0,3	n. d.
Laiton			
poli	0,8-0,95	0,01-0,05	n. d.
Très brillant	n. d.	n. d.	0,3
oxydé	0,6	0,6	0,5

Molybden			
oxydé	0,5-0,9	0,4-0,9	0,2-0,6
non oxydé	0,25-0,35	0,1-0,35	
Nickel			
oxydé	0,8-0,9	0,4-0,7	0,2-0,5
électrolytiquement	0,2-0,04	0,1-0,3	n. d.
Platine			
noir	n. d.	0,95	0,9
Mercure	n. d.	0,05-0,15	n. d.
Argent	n. d.	0,02	n. d.
Acier			
Laminé à froid	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9
Tôle brut	n. d.	n. d.	0,4-0,6
tôle polie	0,35	0,25	0,1
Acier de fusion	0,35	0,25-0,4	n. d.
oxydé	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9
inoxydable	0,35	0,2-0,9	0,1-0,8
Titane			
poli	0,5-0,75	0,3-0,5	n. d.
oxydé	n. d.	0,6-0,8	0,5-0,6
Tungstène	n. d.	0,1-0,6	n. d.
poli	0,35-0,4	0,1-0,3	n. d.
Zinc			
oxydé	0,6	0,15	0,1
poli	0,5	0,05	n. d.
Étain (non oxydé)	0,25	0,1-0,3	n. d.

n.d. : non disponible



Le Mouvement Naturellement Energique !

<http://sycomoreen.free.fr>

Exclusive intellectual property of SYCOMOREEN,
 authorized reproduction solely for non-profit scientific research or educational and school applications

