

Energies renouvelables aujourd'hui et demain

Energie solaire thermique

Michel Bonvin
michel.bonvin@hevs.ch

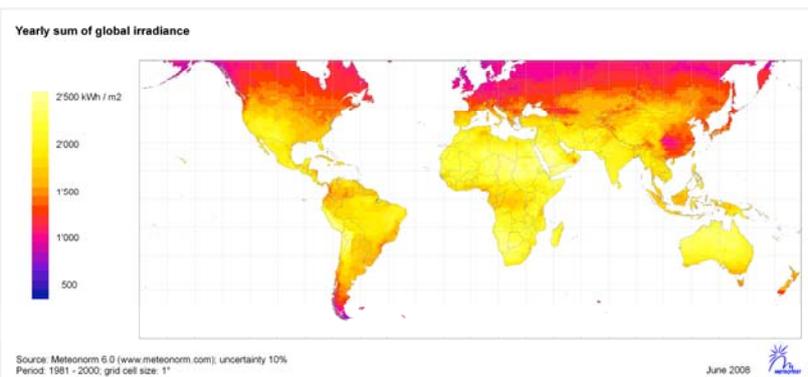
Quelques références

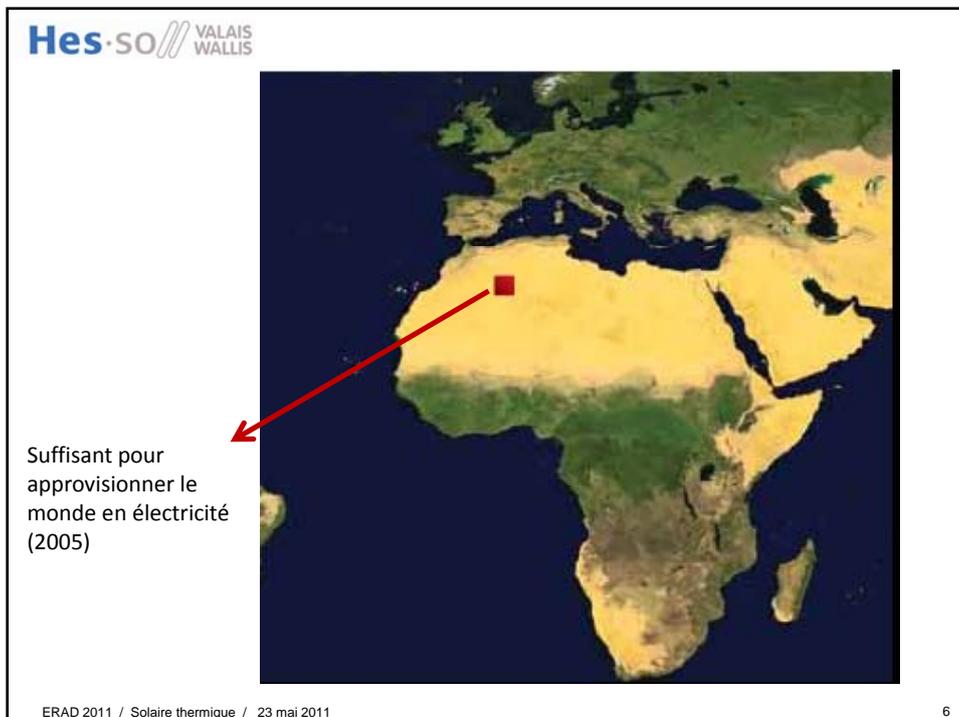
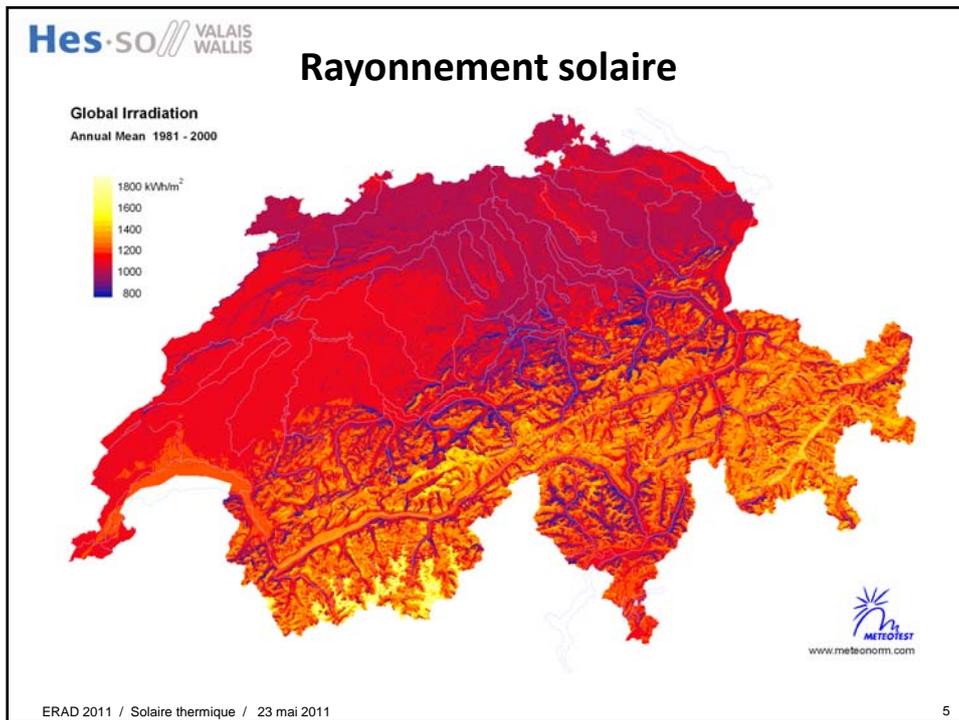
- *John A. Duffie and W. A. Beckmann, Solar Engineering of thermal Processes, 2nd Edition), John Wiley, New York, 1991*
- *Frank P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Edition, Wiley, New York, 2006*
- www.solarenergy.ch
- www.solarpraxis.com
- www.meteotest.ch
- www.sses.ch
- www.estif.org
- www.iea.org
- www.energie-solaire.com
- www.agena-energies.ch
- www.solar-islands.com
- www.eurobserv-er.org

Solaire thermique

- Solaire thermique : **Conversion DIRECTE du rayonnement (irradiance) solaire en énergie thermique**
 - Chauffage des locaux
 - Chauffage de l'eau sanitaire (500-700 kWh/m², 1 m² /pers., 50-100 litres de stock/m²)
 - Rafraîchissement, climatisation
 - Énergie électrique
 - Séchage
 - Dessalement
 - Etc.
- Solaire photovoltaïque : Conversion DIRECTE du rayonnement solaire en énergie électrique

Rayonnement solaire



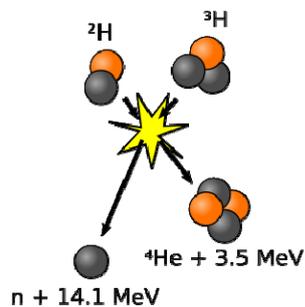


Plan

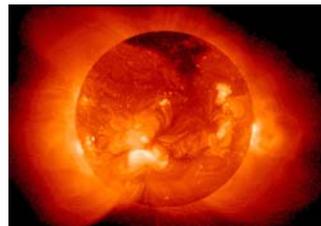
1. Rayonnement : bases physiques
2. Types de capteurs thermiques, niveau de température
3. Centrales solaires à concentration
4. Applications particulières
5. Perspectives

Le soleil

- Fusion thermonucléaire (deutérium et tritium qui se combinent pour former de l'hélium)



- Distance Terre-Soleil : $1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- Rayon moyen : $6.95 \cdot 10^8 \text{ m}$
- Température en surface : 5800 K
- Puissance reçue par la Terre (hors atmosphère): $1.7 \cdot 10^{17} \text{ W}$
- 1 h de rayonnement solaire équivaut à la consommation mondiale d'énergie en 1 an
- Espérance de vie du soleil: **7.6 milliards d'années**

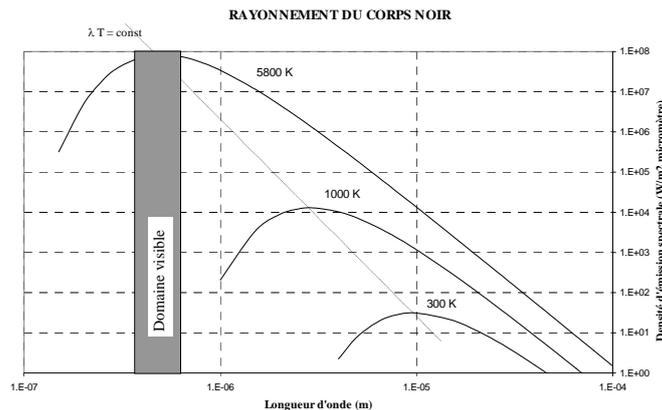


Rayonnement du corps noir (rayonnement émis - loi de Plank)

$$G(\lambda)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} d\lambda$$

- $G(\lambda)d\lambda$: flux de ray. émis dans le domaine $d\lambda$ [W/m²]
 λ : longueur d'onde d'émission [m]
 T : température absolue du corps [K]
 h : constante de Plank : **$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Js**
 c : vitesse de la lumière dans le vide : **$c = 3 \cdot 10^8$ m/s**
 k : constante de Boltzmann : **$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K**

Loi de Wien

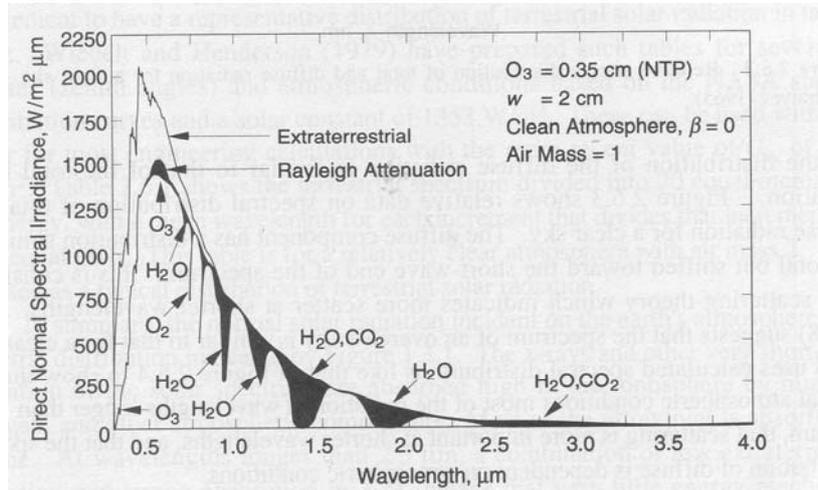


Loi de Wien

La longueur d'onde sous laquelle le rayonnement **maximal** est émis est fonction de la température de surface du corps rayonnant :

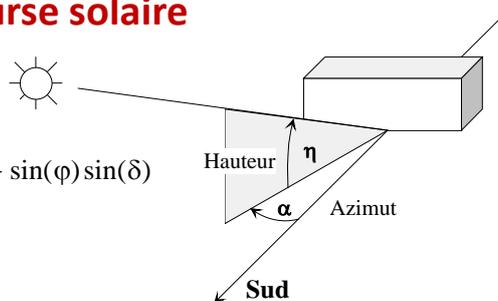
$$\lambda T = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

Rayonnement reçu (sous atmosphère)



Facteur de réduction entre émission et réception :
 (dist. Soleil-Terre/rayon Soleil)² = 46'000

Course solaire



$$\sin(\eta) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega t) + \sin(\varphi) \sin(\delta)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega t)}{\cos(\eta)}$$

Les valeurs des angles α et η peuvent être estimés à l'aide des relations suivantes :

φ : latitude du lieu considéré [-]
 ω : vitesse angulaire de rotation de la Terre autour de son axe :

$$\omega = \frac{2\pi}{24h}$$

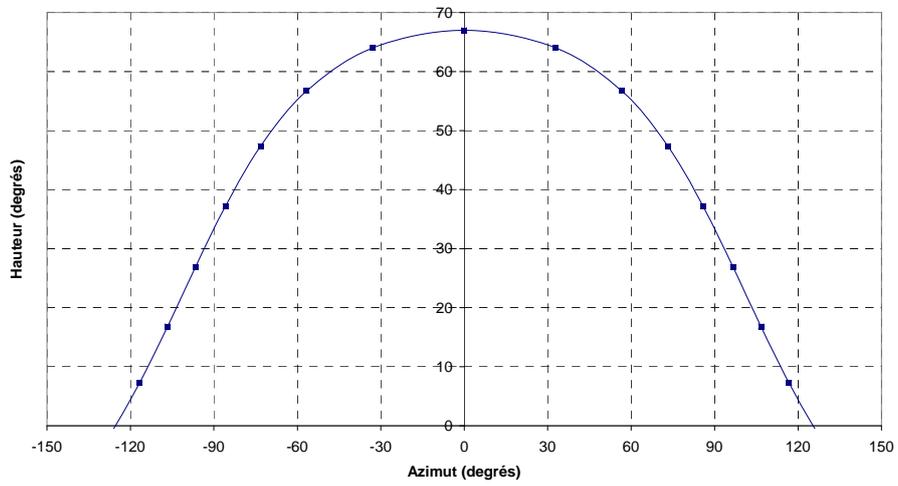
δ : déclinaison solaire

$$\delta = -\delta_0 \cos(\Omega t) \text{ avec } \delta_0 \approx 23.5^\circ$$

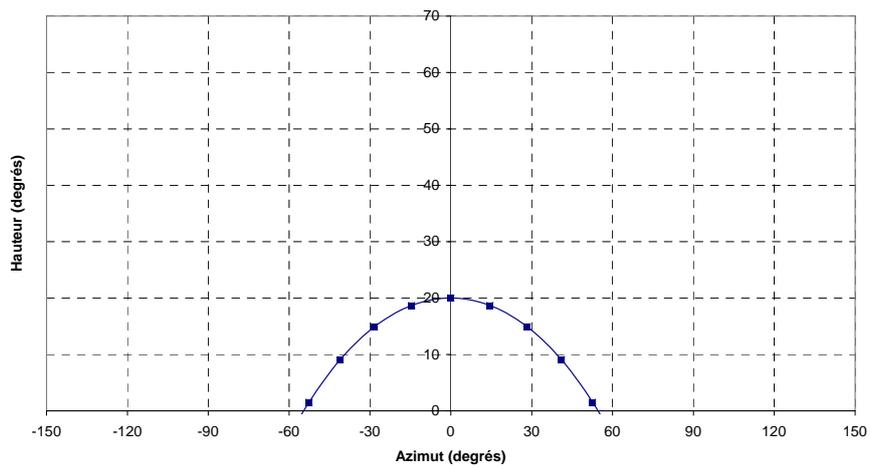
Ω : vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil :

$$\Omega = \frac{2\pi}{365 \text{ jours}}$$

Sion, solstice d'été

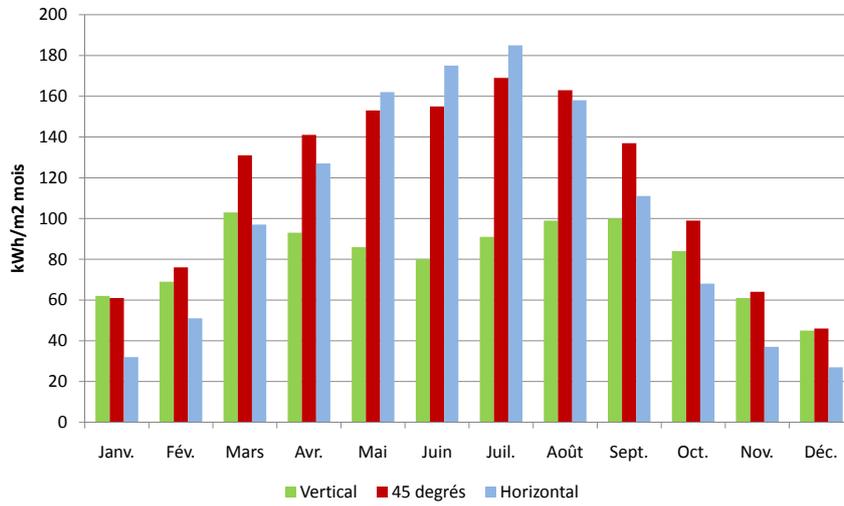


Sion, solstice d'hiver



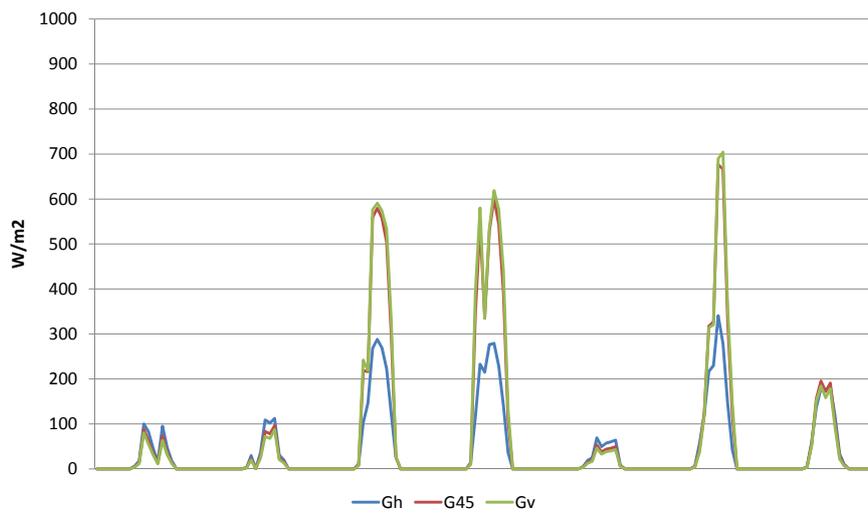
Rayonnement solaire disponible

Lausanne - Orientation Sud



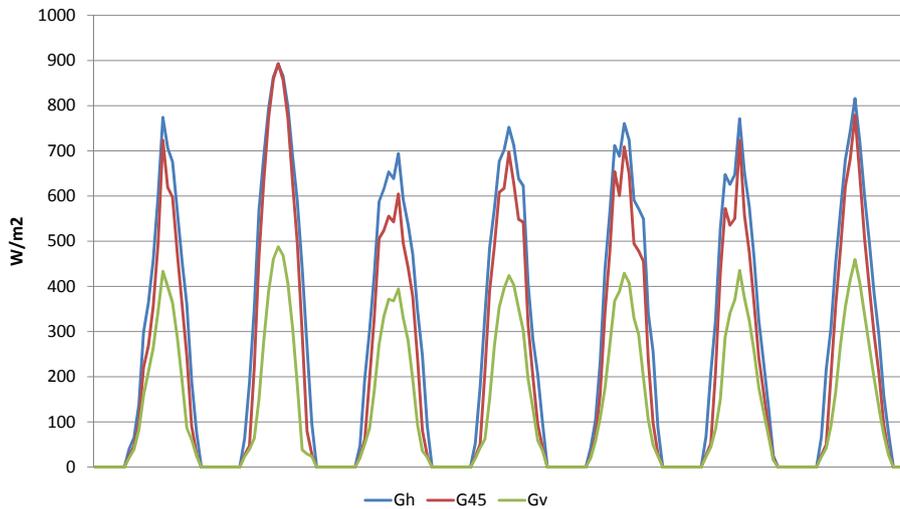
Rayonnement solaire disponible

Lausanne - Orientation Sud - Janvier



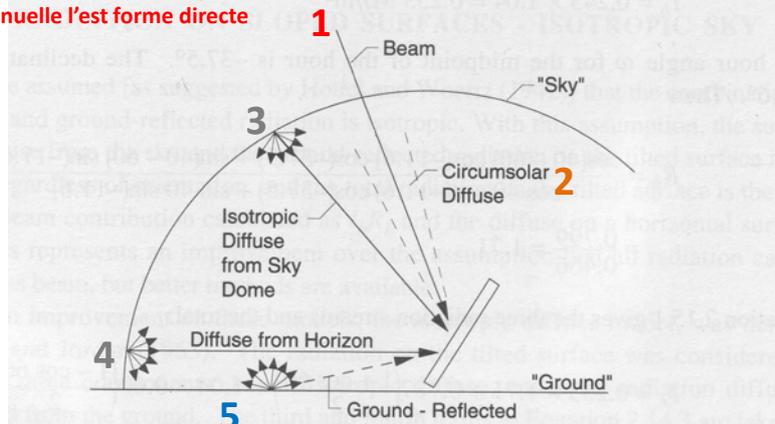
Rayonnement solaire disponible

Lausanne - Orientation Sud - Juin



Modèle utilisé par METEONORM

En Suisse, pour une surface bien orientée, environ 50 % de irradiation annuelle l'est forme directe



Facteur de réflexion (albedo) :
Variable selon les saisons
entre 30 et 90 %

Résistances thermiques

$$\dot{q} = \frac{1}{R} (T_1 - T_2)$$

- \dot{q} : Flux thermique [W/m²]
- R : Résistance thermique [m² K/W]
- T : Température [K]

a) Conduction : $R = \frac{\lambda}{d}$

b) Convection, rayonnement thermique : $R = \frac{1}{h}$

λ : conductivité thermique [W/mK]

d : épaisseur [m]

h : coefficient de transfert thermique [W/m²K]

$h_{\text{convection}} = 2.8 + 3.0 v$ surface extérieure (v : vitesse du vent en m/s)
 = 3.0 espace intérieur entre absorbeur et vitre

$h_{\text{rayonnement}} = 4 F_{12} \sigma T^3$

Deux plaques parallèles infinies avec des émissivités ε_1 et ε_2 : $F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$

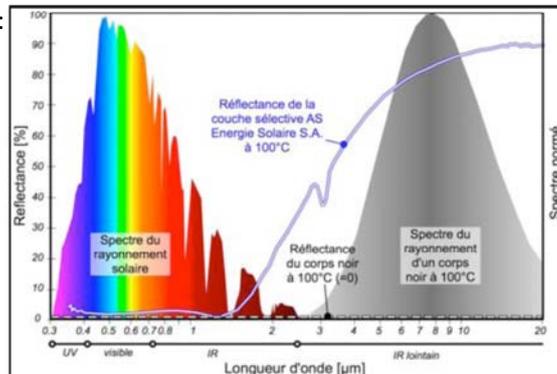
$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (Stefan-Boltzmann)

T = température moyenne (en K)

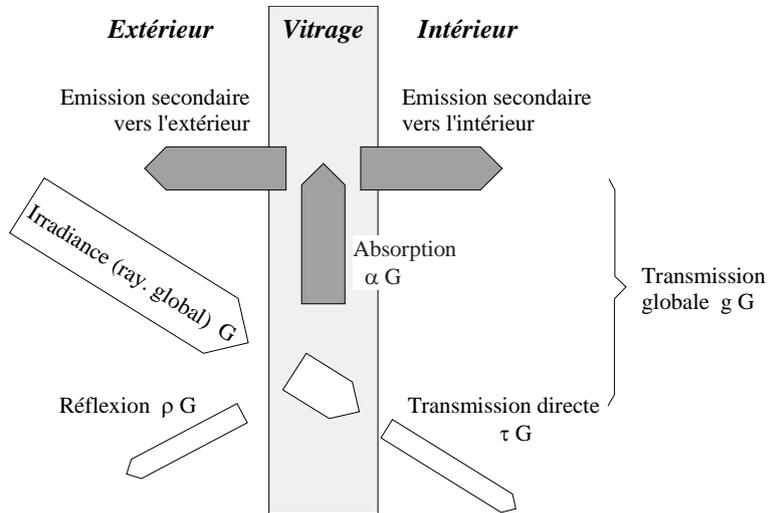
Coefficients d'Emission, d'Absorption, de Réflexion

- Pour un corps noir : $\varepsilon = \alpha$
- Pour un absorbeur : $\alpha + \rho = 1$

- Pour un absorbeur sélectif :
 - α est grand (> 0.9) dans le domaine visible, donc ρ est petit
 - ρ est grand (> 0.9) dans le domaine infrarouge



Rayonnement à travers un vitrage



Capteur plan non vitré



Capteur plan non vitré : modèle simplifié

$$\alpha G = 2c\rho\dot{V}(T_m - T_i) + \left(\frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{ray}} \right) (T_m - T_a)$$

- a : Coefficient d'absorption 0.9
- G : Flux du rayonnement solaire 800 W/m²
- c : Chaleur massique de l'eau 4200 J/kg K
- $\rho\dot{V}$: Débit massique spécifique 0.035 kg/s m²
- T_m : Température moyenne du capteur
- T_i : T de l'eau à l'entrée du capteur 30 °C
- R_{conv} : Résistance à la convection 0.07 m² K/W
- R_{ray} : Résistance au rayonnement (sélectif) 2 m² K/W

- → T_m = 32.5 °C

- rendement = $\frac{2c\rho\dot{V}(T_m - T_i)}{G} = 84.5\%$

Capteur plan non vitré : selon fiche descriptive

(Solardach AS+)

$$\eta = \eta_0 - b_1 x - b_2 x^2 G \quad \text{avec} \quad x = \frac{T_m - T_a}{G}$$

- T_m = 32.5 °C
- T_a = 20 °C
- G = 800 W/m²K
- x = 0.0156 m² K/W
- η₀ = 0.959
- b₁ = 8.91 W/m²K
- b₂ = 0.047 W/m²K²
- → η = 81.1 %

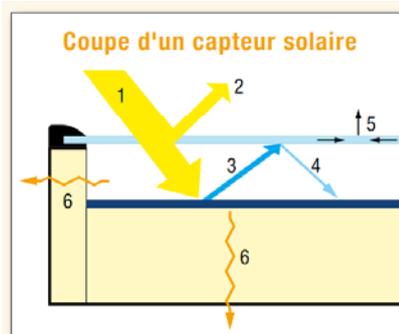
Capteur plan vitré



Capteur plan vitré



Capteur plan vitré



- | | |
|--|--|
| 1. Rayonnement solaire | 4. Rayonnement réfléchi par le vitrage |
| 2. Rayonnement réfléchi par le vitrage | 5. Rayonnement émis par le vitrage |
| 3. Rayonnement émis par l'absorbeur | 6. Pertes thermiques du coffre |

Capteur plan vitré : selon fiche descriptive

(Cobralino Evo)

$$\eta = \eta_0 - b_1 x - b_2 x^2 G \quad \text{avec} \quad x = \frac{T_m - T_a}{G}$$

- $T_m = 52.5 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $G = 800 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $x = 0.0406 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
- $\eta_0 = 0.817$
- $b_1 = 3.84 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $b_2 = 0.0084 \text{ W/m}^2\text{K}^2$
- $G = 800 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\rightarrow \eta = 65 \%$

Capteur sous vide

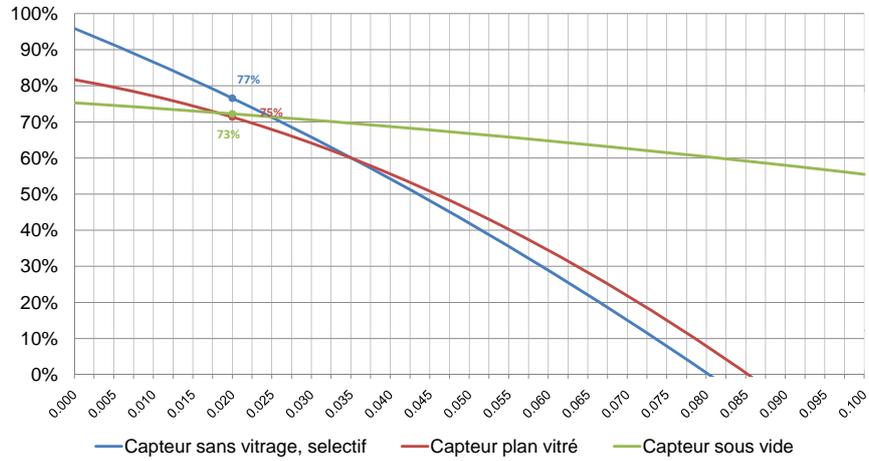


Capteur sous vide : selon fiche descriptive (Soltop T6-DF)

$$\eta = \eta_0 + b_1 x + b_2 x^2 G \quad \text{avec} \quad x = \frac{T_m - T_a}{G}$$

- $T_m = 82 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $G = 800 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $x = 0.0775 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
- $\eta_0 = 0.753$
- $b_1 = 1.42 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $b_2 = 0.0071 \text{ W/m}^2\text{K}^2$
- $G = 800 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\rightarrow \eta = 61 \%$

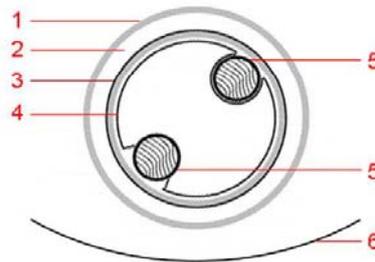
Rendements types de capteurs thermiques



Capteurs à concentration



Capteurs à concentration



Capteurs à concentration



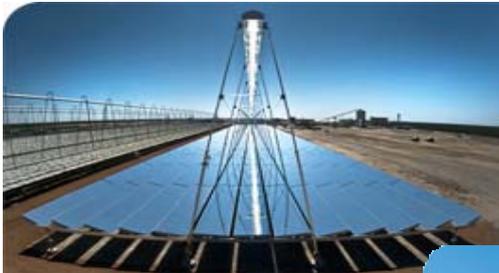
Capteurs à concentration



Capteurs à concentration : Moteur de Stirling



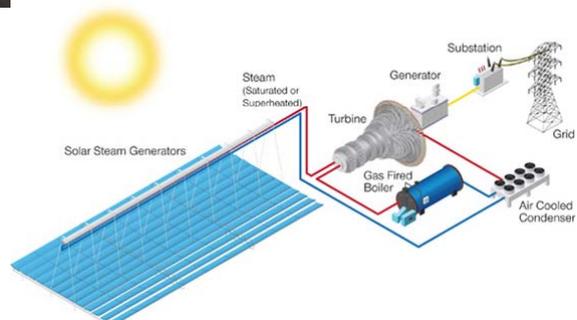
Capteurs à concentration : Miroirs de Fresnel



ERAD 2011 / Solaire thermique / 23 mai 2011

37

Capteurs à concentration : Miroir parabolique (Egypte)



ERAD 2011 / Solaire thermique / 23 mai 2011

38

Capteurs à concentration : Andasol

electrical generation process

SOLAR IRRADIANCE
SOLAR FIELD
Surface 510,120 m²

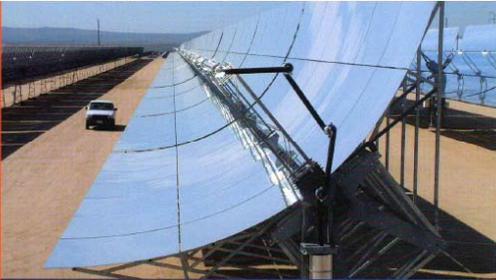
With 2,201 kWh/m² year solar irradiance, the thermo solar power station receives 1,098,618 MWh/year of irradiance in the solar field annually. Thus, it produces 464,703 MWh/year of solar steam for the turbine with a 43% of annual average efficiency.

CONVERSION IN STEAM CYCLE
STEAM TURBINE

49.9 MW
38.1% efficiency
3,644 annual operating hours
Annual electrical generation of 181,831 MWh/year

ANNUAL ELECTRICAL PRODUCTION
ELECTRICAL GRID

49.9 MW
Annual supply to the electrical grid:
179,103 MWh/year of thermal solar energy
Annual average efficiency of solar irradiance to electrical energy: 16%




ERAD 2011 / Solaire thermique / 23 mai 2011 39

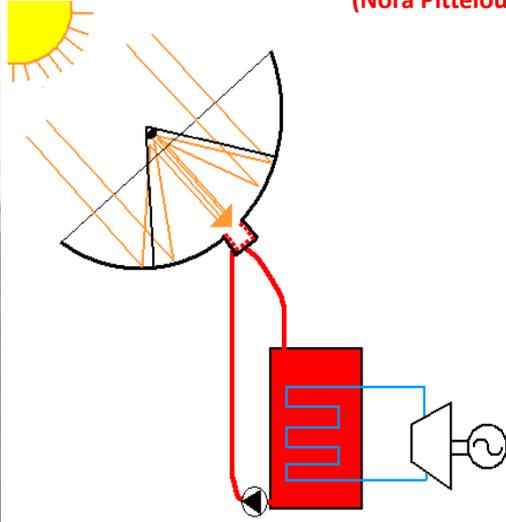
Capteurs à concentration : Andasol






ERAD 2011 / Solaire thermique / 23 mai 2011 40

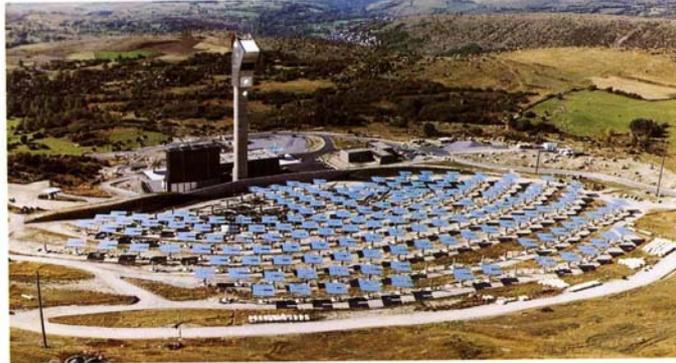
Capteurs à concentration (Nora Pitteloud)



Capteurs à concentration (PS20, Séville)



Capteurs à concentration : Themis (Targassonne)



Vue générale depuis le Nord-Est

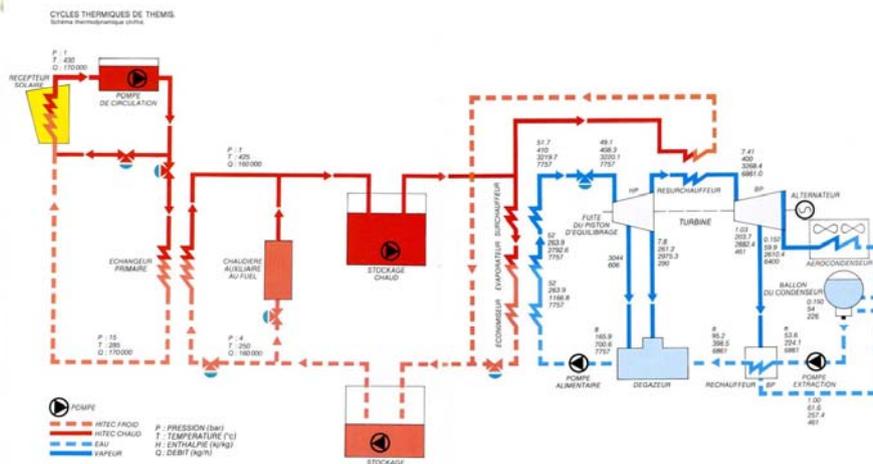
Historique

En France, les centrales électro-solaires à tour sont étudiées depuis 1976 par le Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S.) et Electricité de France (E.D.F.) sous le nom de programme THEM (Thermo-Hélio-Electrique-Mégawatt).

Le 30 septembre 1977, le Conseil des Ministres décidait de l'implantation de la Centrale THEM 1, dans les Pyrénées Orientales.

Le 20 juin 1979, le Conseil des Ministres décida

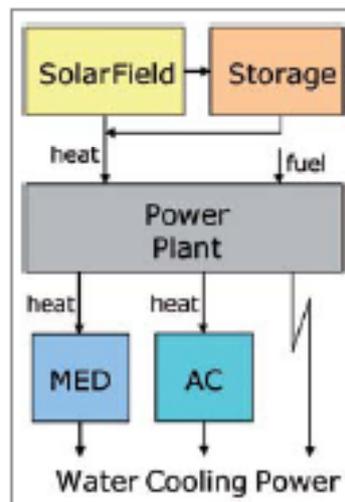
Capteurs à concentration : Themis



Le projet DESERTEC

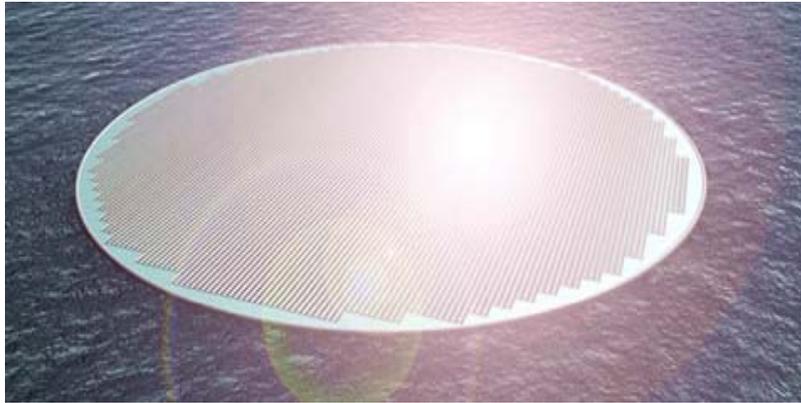


Le projet DESERTEC



Dessalement, Climatisation, Electricité

« Iles solaires » un concept du CSEM



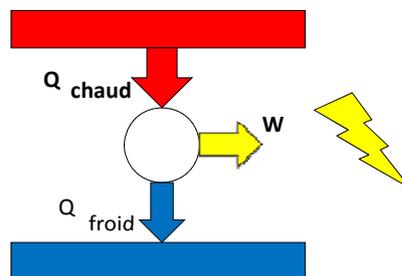
Conversion d'énergie thermique en travail (Carnot - 1834)

- Il faut du **CHAUD** et du **FROID** pour produire du travail
- Rendement maximal :

$$\eta_{\text{maximal}} = 1 - \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}$$

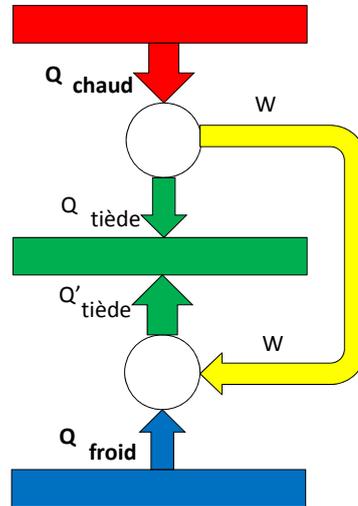
- Les effets d'échangeur

$$\eta_{\text{endorév.}} = 1 - \sqrt{\frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}}$$



Production de froid à partir de chaleur (solaire)

$$COP_{maximal} = \frac{T_{froid}}{T_{chaud}} \frac{T_{chaud} - T_{tiède}}{T_{tiède} - T_{froid}}$$

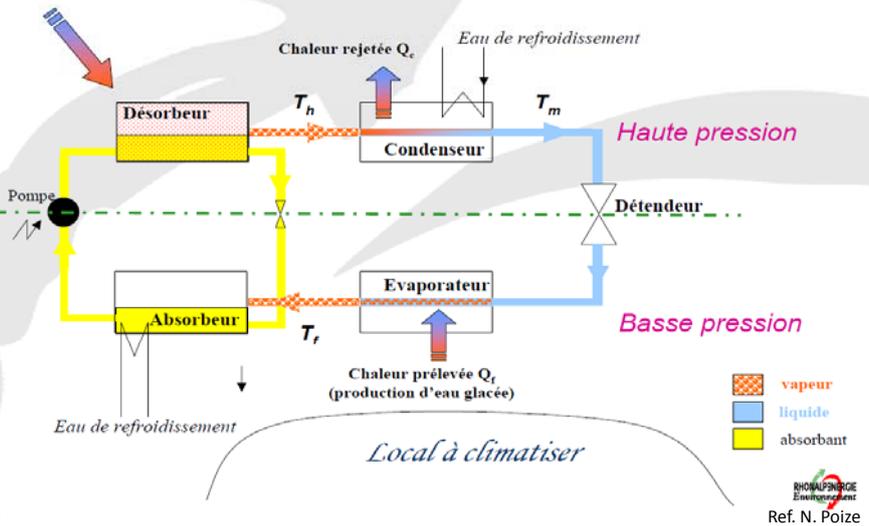


Production de froid Ordres de grandeur des COP

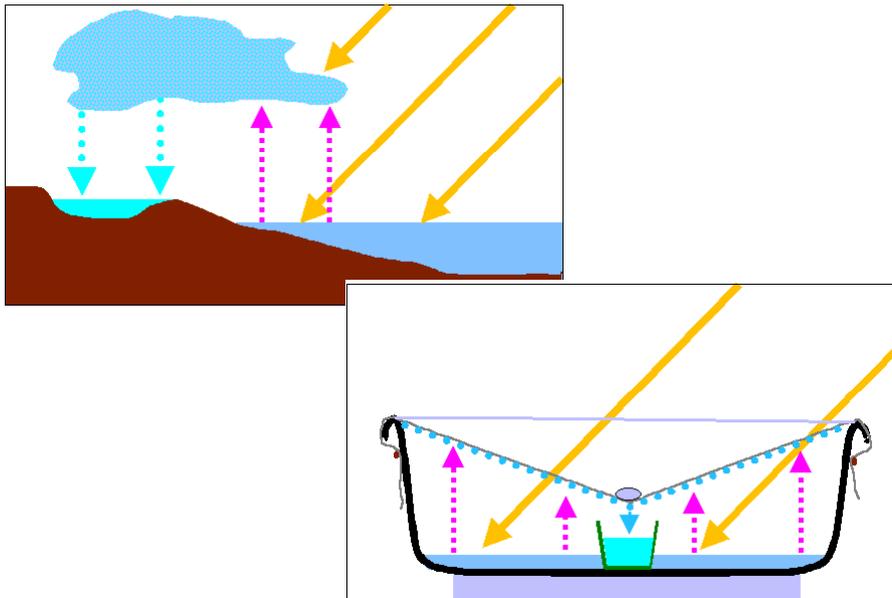
T_chaud (oC)	T_froid (oC)	COP_endorév.
200	20	2.9
200	5	1.1
200	0	0.9
100	20	1.5
100	5	0.6
100	0	0.5
50	20	0.5
50	5	0.2
50	0	0.1

Climatisation à absorption

Apport de chaleur Q_h
(capteurs solaires)

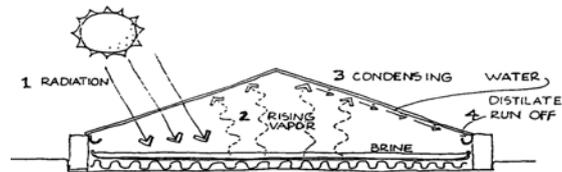


Dessalement d'eau



Dessalement d'eau

Figure 1. Solar Distillation Process



Fresh Water from the Sun, by Daniel C. Dunham, (Washington, D.C., August 1978), p. 16.

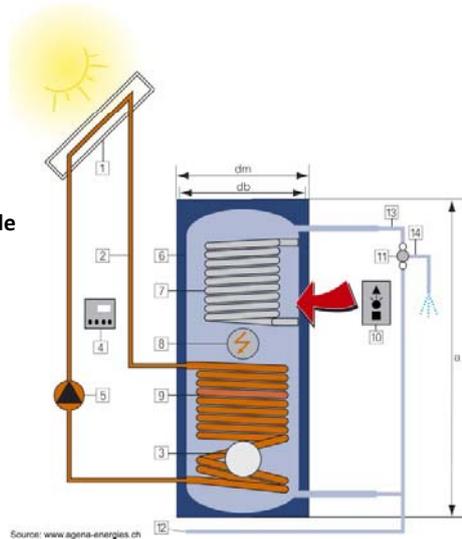
Dessalement d'eau



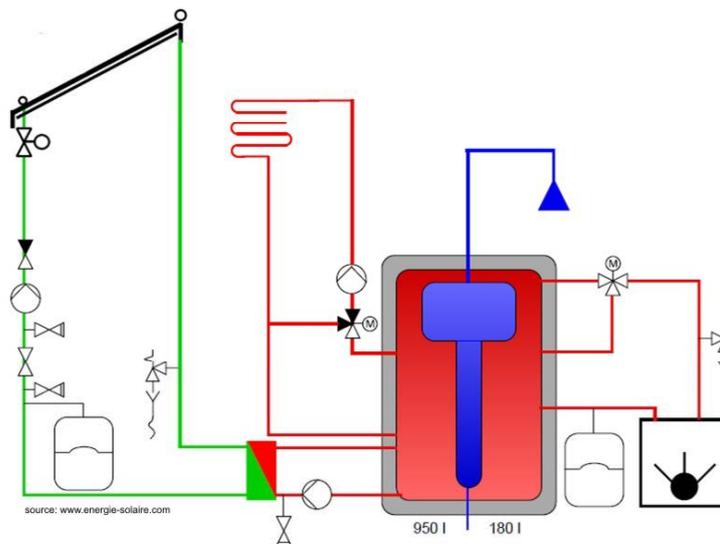
2 à 5 litres d'eau par jour
et par m² suivant
l'ensoleillement

Systèmes solaires

1. Capteurs solaires
2. Conduites hydrauliques
3. Flasque de nettoyage
4. Régulation automatique
5. Circulateur solaire à débit variable
6. Chauffe-eau sanitaire
7. Echangeur de chaleur chaudière
8. Appoint électrique (option)
9. Echangeur de chaleur solaires
10. Appoint chaudière
11. Mitigeur thermostatique
12. Entrée eau froide
13. Sortie eau chaude
14. Eau chaude mélangée



Systèmes solaires



Stockage de la chaleur

- Hypothèses :
 - Stock eau liquide
 - Cylindre „optimal“ (Rayon = $\frac{1}{2}$ Hauteur)
 - Epaisseur d'isolation : $d = \frac{1}{2}$ Rayon

- Durée de stockage

Hauteur [m]	Rayon [m]	d_{isol} [m]	V [m ³]	Durée [jour]
0.5	0.25	0.125	0.1	1
1	0.5	0.25	0.8	5
2	1	0.5	6.3	20
10	5	2.5	785	500

Stockage de la chaleur

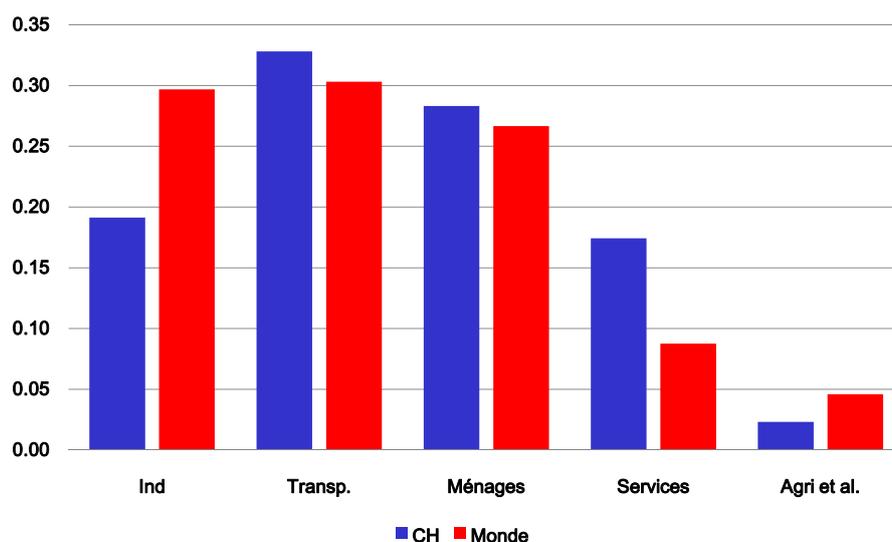
- Un stock aux dimensions imposantes
 - Permet d'y loger une grande quantité de chaleur
 - Assure une grande durée de stockage

Installations solaires thermiques : Aspects financiers

- Installation pour la production d'ECS (villa individuelle)
 - 10'000 à 14'000 CHF
 - Temps de retour sur investissement < à 15 ans
- Production d'ECS (bât. collectif, centre sportif,...)
 - 1'200 à 1'500 CHF par m² de capteurs
 - Temps de retour sur investissement entre 10 et 15 ans
- Installations solaires combinées ECS et chauffage
 - 30'000 à 35'000 CHF (sans chaudière d'appoint) pour une villa individuelle
- Piscines
 - 1'000 à 1'200 CHF par m² de capteurs

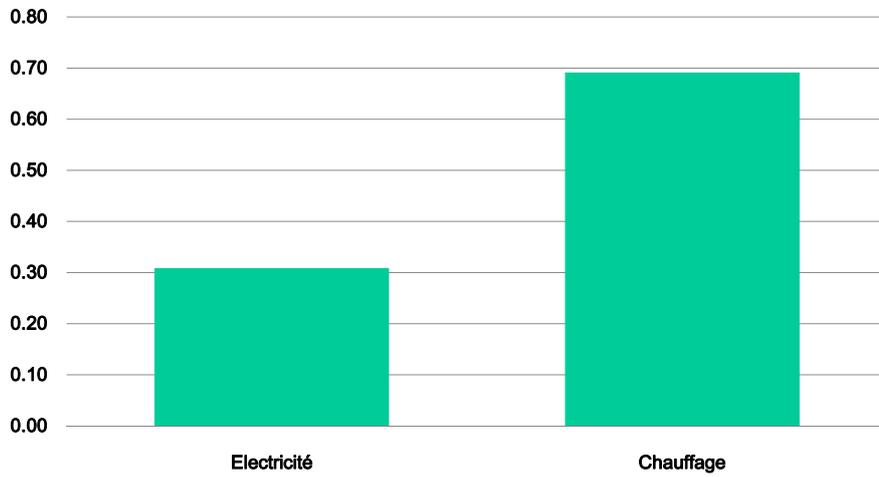
Perspectives

Energies finales pour quels usages (2006)



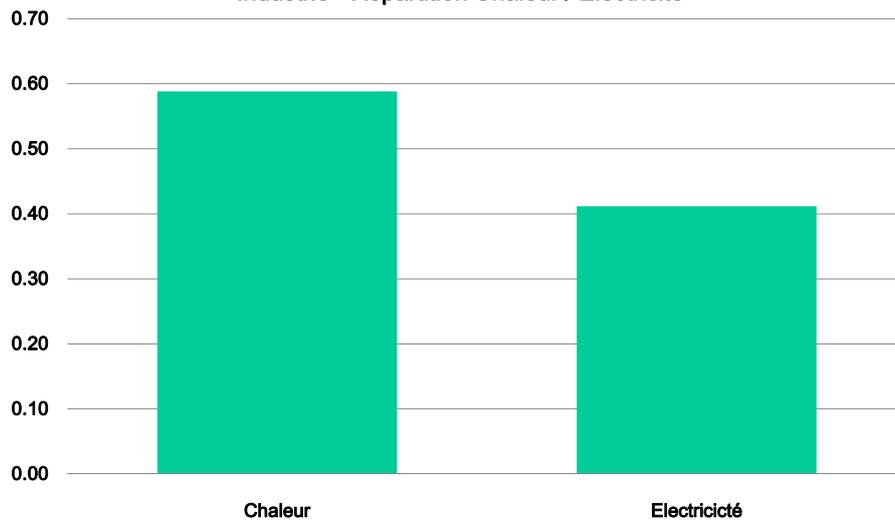
Perspectives

Ménages et Services

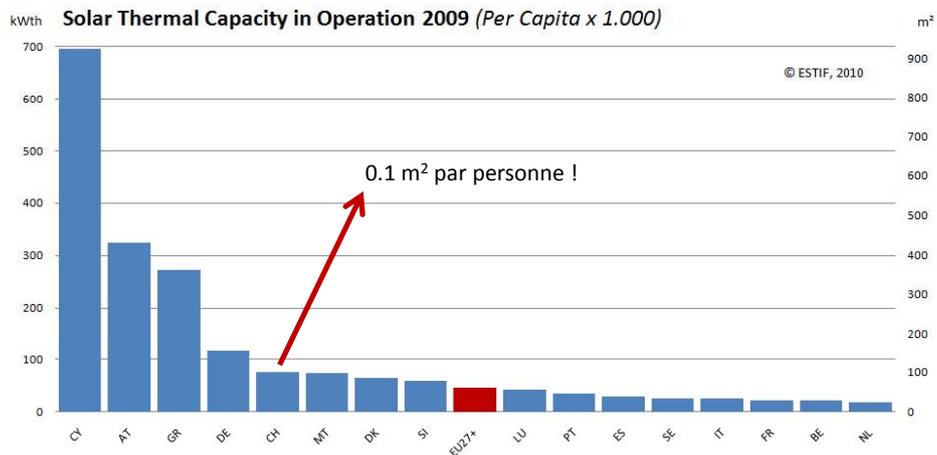


Perspectives

Industrie - Répartition Chaleur / Electricité



Perspectives



Perspectives

- Le Suisse utilise 50 kWh de chaleur par jour, c'est-à-dire **18'000 kWh** par année (ménages, services, industries)
- Pour couvrir ces besoins, il lui faudrait donc **30 m² de capteurs solaires**
- Or, il n'en possède en réalité que **0.1 m²**

• **Il y donc du travail, pour chacun et pour longtemps !**