

Claude ROYERE

CNRS / IMP

Centre du Four Solaire Félix TROMBE

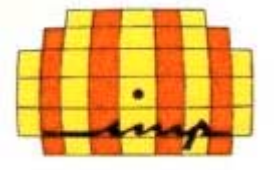
Odeillo

Claude.Royere@imp.cnrs.fr

"Concentration du rayonnement solaire pour
la production de chaleur primaire solaire"

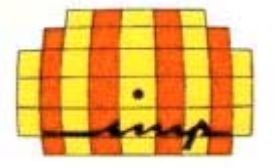
"GAT n°7: Solaire Thermique"

Lieu: IMP Perpignan, Zone d'activité Technosud
Date: 16 Octobre 2002



"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

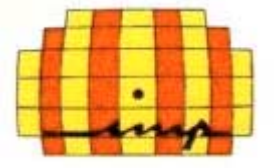
- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?
- ❑ Contexte économique.
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener.
- ❑ Bibliographie



Introduction :

Contexte environnemental et énergétique. !

- Les émissions de CO_2
- La consommation d'énergie
- Une “ décarbonisation historique ” insuffisante
- L’ “ ère des gaz ”
- L'ampleur de la tâche : exemple l’ “ ère du nucléaire ”
- L'énergie primaire nucléaire : perspectives d'utilisation
- Les cycles thermochimiques
- La source d'énergie primaire
 - Nucléaire
 - Solaire

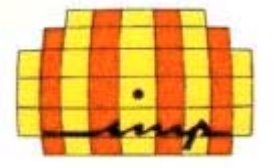


Contexte environnemental et énergétique.

	Total Fossil Fuels	Petroleum	Nat. Gas	Coal
World	6443,38	2708,11	1347,93	2387,34
US	1571,14			
W Eur	999,62			
E Eur	844,23			
Ge	219,72			
Fr	109,44			
Asia Oceania	1970,22			
Source : World 2000, US DOE EIA ; M metric t C equiv				
Préparé par C.Royère, Septembre 2002				

Les émissions de CO₂

C.Royère



Contexte environnemental et énergétique.

Q/yr	World	US	Fr	W Eur
Total primary	397,40	98,79	10,41	71,29
Petroleum	154,28	38,4	4,17	30,30
Nat. Gas	90,15	23,11	1,55	15,46
Coal	94,22	22,50	0,60	9,85
Net Hydroelectric	27,80	3,09	0,69	5,79
Net Nuclear	25,66	8,01	4,08	8,88
Net Geoth. Sol. Wind Wood Waste	2,99	1,02	0,04	0,85

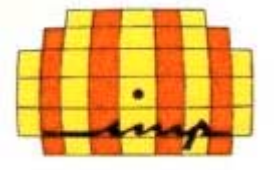
Source : World 2000, US DOE EIA ; $Q=10^{15}$ Btu = $1,055056 \cdot 10^{18}$ J

***H2 mondial : 45 Mt/an (Gaudernack et al. , 1998) soit 5,4 EJ/an (5,12 Q/an)
environ 129 Mtep/an environ 1,29% world total primary
si SMR 67 Mt C equiv / year soit environ 1,04% world C equiv production***

Préparé par C.Royère, Septembre 2002

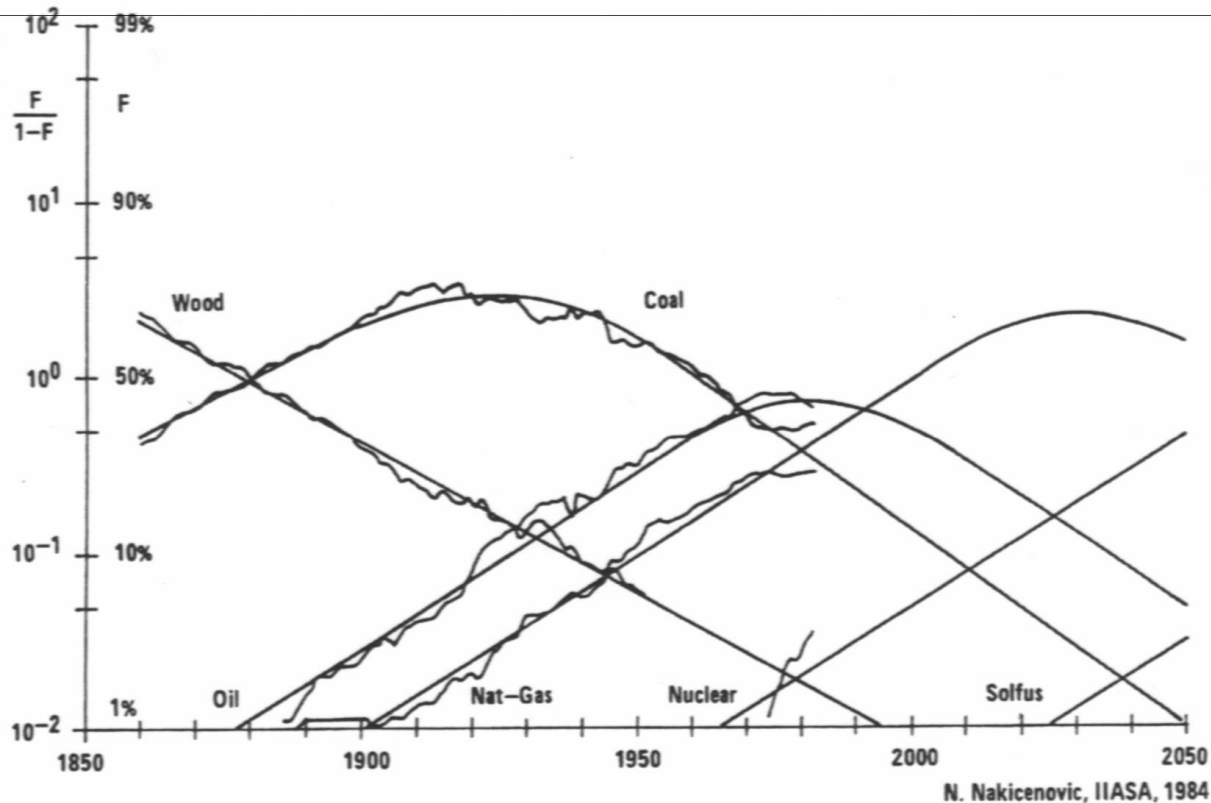
La consommation d'énergie

C.Royère



Contexte environnemental et énergétique.

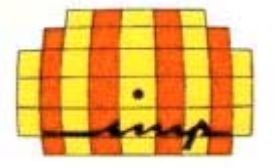
Figure 1. World primary energy substitution



Une “décarbonisation historique” insuffisante:

Sce: Marchetti, NEA-OECD, 2000

C. Royère

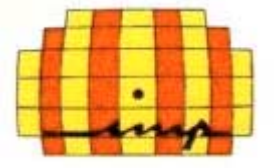


Contexte environnemental et énergétique.

	World total						
	1	2	3	4	5	6	7
	IIASA(A2)	IIASA(A2)	Nuclear intensive	IIASA(A2)	Nuclear intensive	Hydrogen	IIASA(C2)
1 Year		2000	2030	2030	2050	2050	2050
2 Population(Millions)		6168	8751	8751	10056	10056	10056
3 GDP(G\$)		27436	61597	61597	101519	101519	75050
4 GDP/Capita k\$		4,4	7	7	10,1	10,1	7
5 Primary Energy(Mtoe)		10710	18408	18408	24840	24840	14250
6 Primary Electricity(Mtoe)		4107	8060	8021	10231	10231	6524
7 Nuclear(Mtoe)		493	684	4902	1092	7034	2163
8 Fossil elec.		3008	5894	1638	6409	467	1378
9 Nuclear+renewables		1099	2165	6383	3822	9764	18776
10 % Electricity		38.35	43.78	43.78	41.19	41.19	81.14
11 Nuclear %El.		12	8,49	61,12	10,68	68,75	79,62
12 Renewable% El.		14,75	18,38	18,38	26,68	26,68	13,54
13 Fossil elec.%		73.25	73.13	20.42	62.64	4.57	6.84
14 Nuclear(Gwe)		275	376	3387	607	4466	8915
15 Nuclear(% total)		4,6	3,72	26,63	4,4	28,32	64,6
16 CO2(Mt C)		6976	11693	8465	16838	12695	5106
17 Saved CO2 %				27,61		24,61	69,68
18 CO2(Mt C) OECD		3146	3973	1648	4266	2040	746
19 Unat tons/year		31690	43983	315142	62414	401957	916951
20 Cumulative tons U nat			1,39E+06	4,10E+06	2,45E+06	1,13E+07	1,64E+07

TABLE 1

L'ampleur de la tâche : exemple, l' " ère du nucléaire "



Contexte environnemental et énergétique.

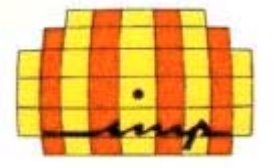
The heat utilisation systems addressed within the activities of the CRP included the following:

- Steam reforming of methane for the production of hydrogen and methanol.
- Carbon dioxide reforming of methane for the production of hydrogen and methanol.
- Thermo-chemical water-splitting for hydrogen production.
- High temperature electrolysis of steam for hydrogen production.
- Coal gasification – hydrogasification and steam gasification.
- Steam generation and heavy oil recovery.
- Upgrading of high CO₂ natural gas.

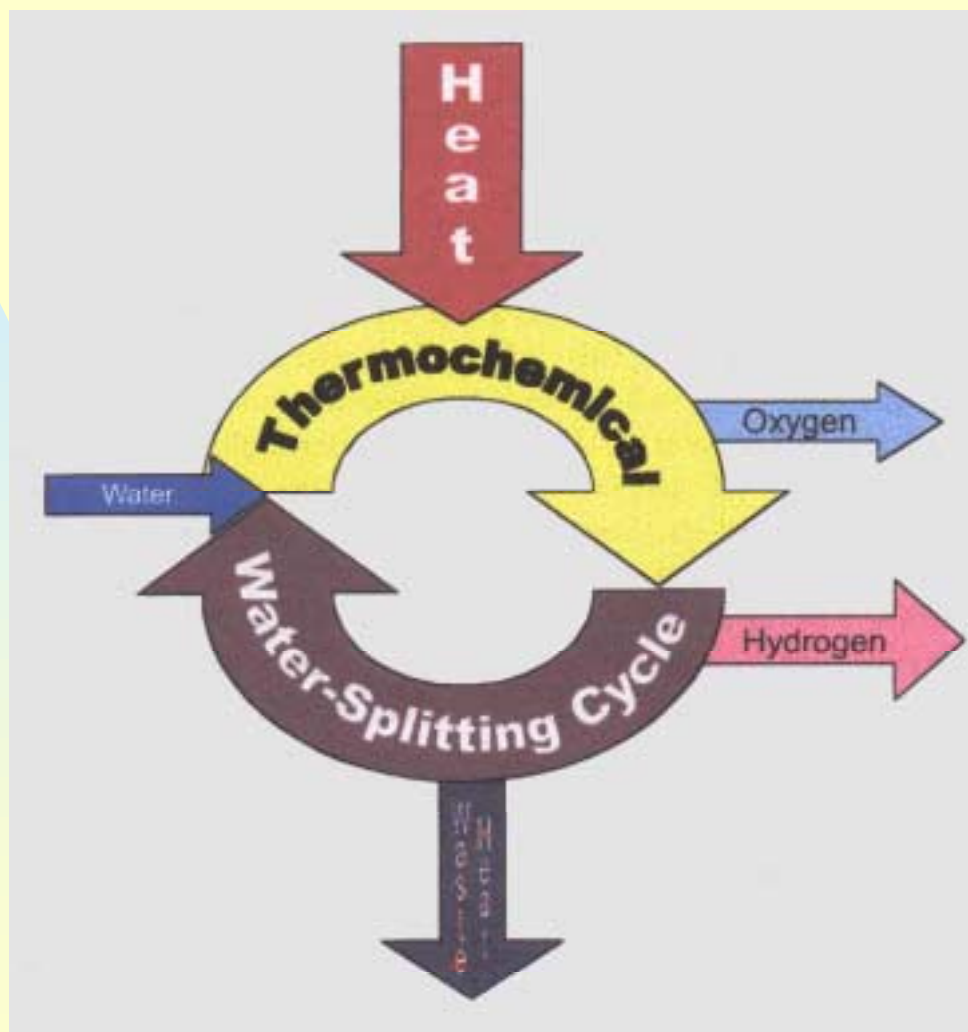
L'énergie primaire nucléaire : perspectives d'utilisation

Nuclear heat utilizations (J.M. Kendall, IAEA,
in OCDE, NEA 2000, p.89-97)

C.Royère



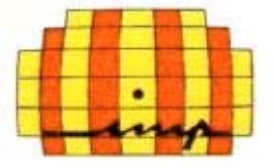
Contexte environnemental et énergétique.



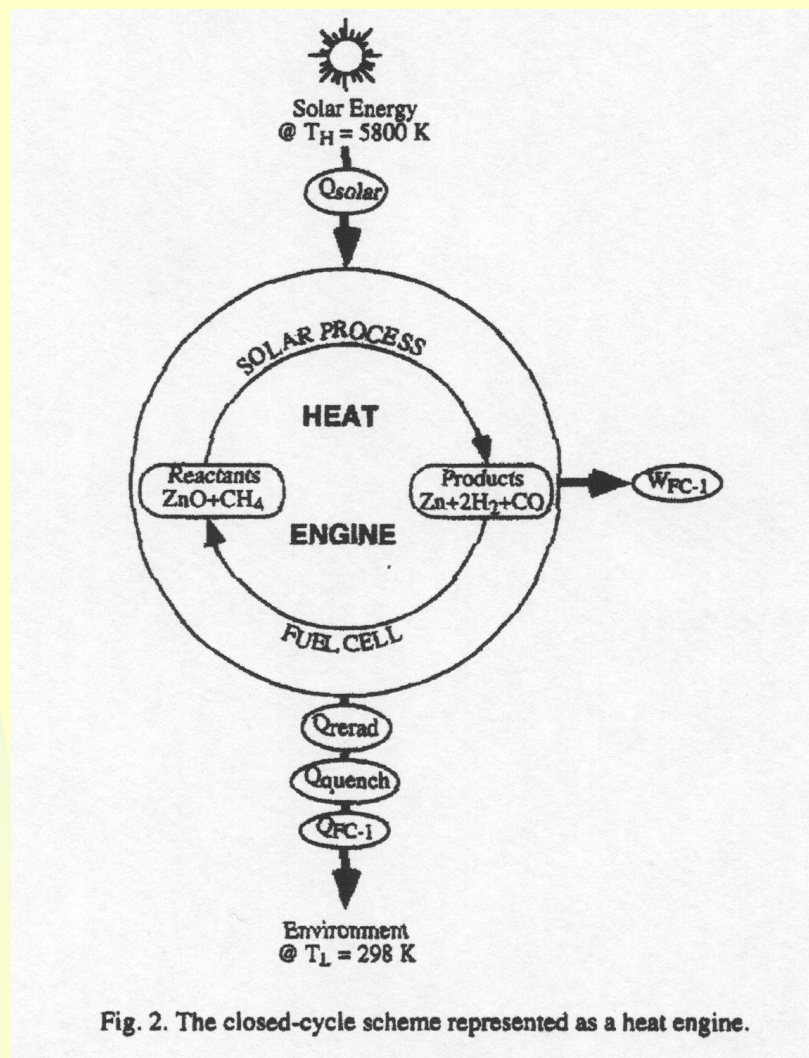
Les cycles thermochimiques

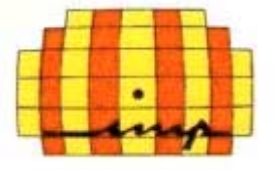
Brown et al. , 2000, GA-A23451

C.Royère



Contexte environnemental et énergétique.





Contexte environnemental et énergétique.

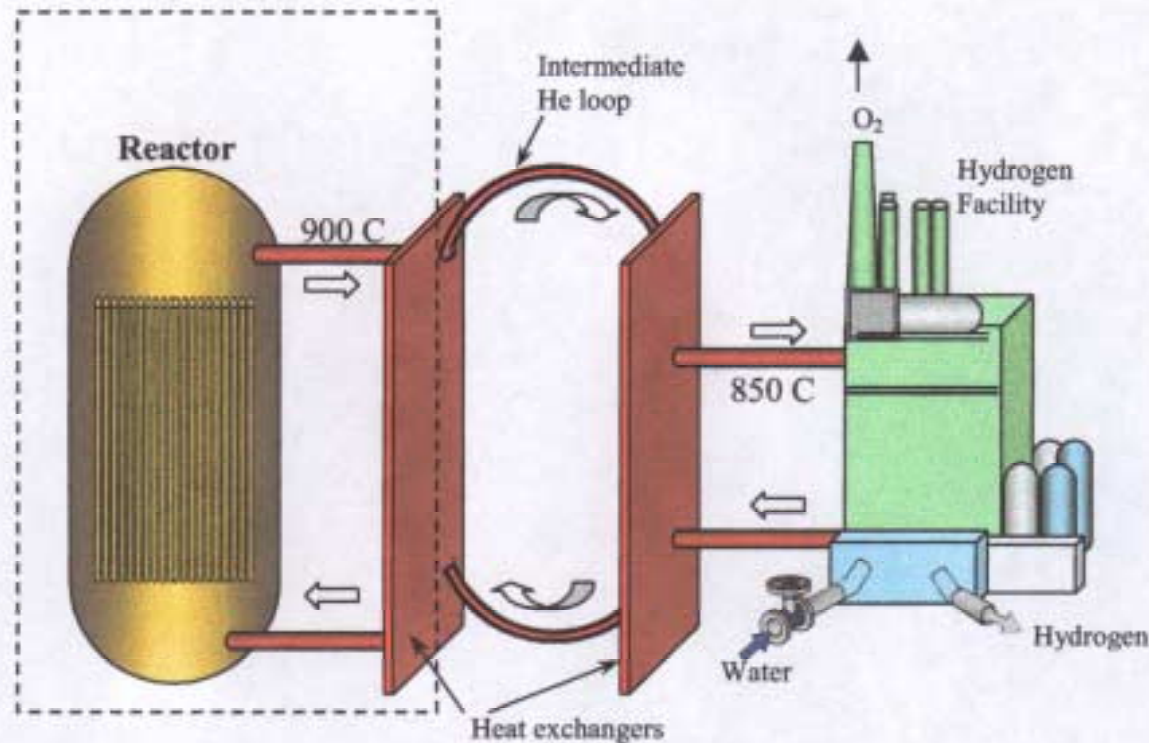
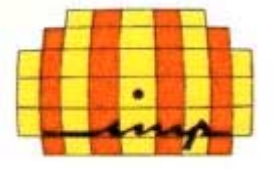


Figure 2 Schematic of nuclear reactor heat source with a water/thermochemical hydrogen production system.

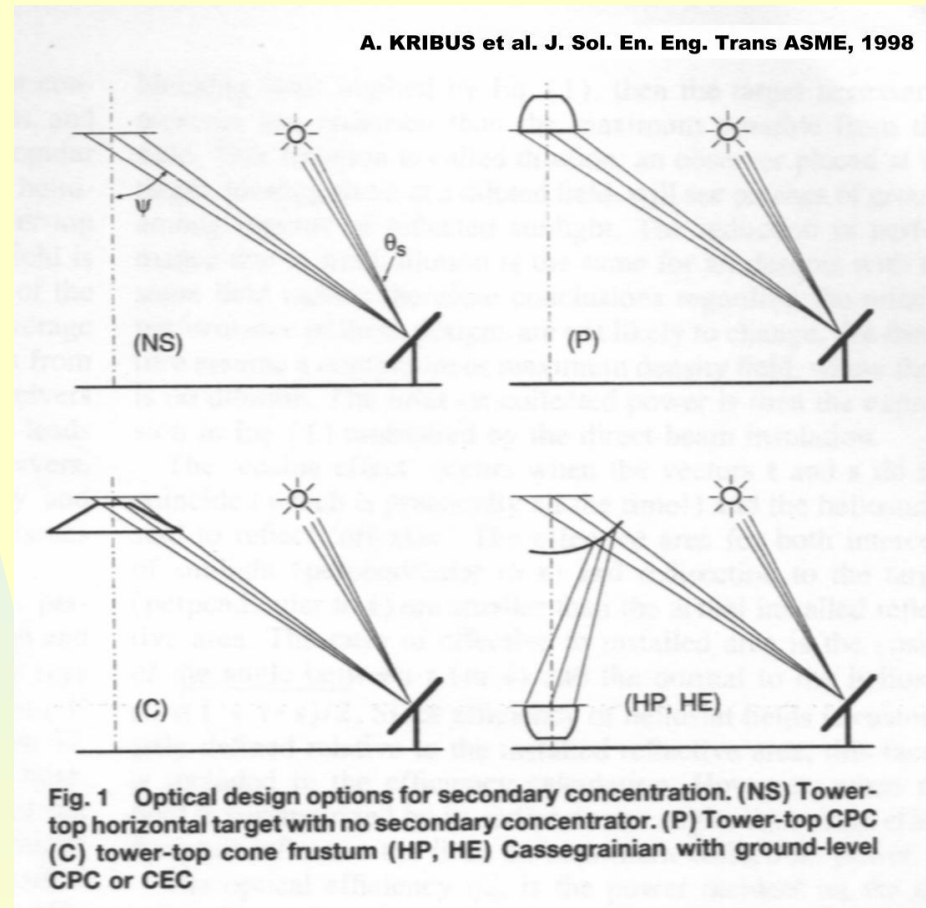
La source d'énergie primaire Nucléaire

Marshall, 2002, SAND2002-0513

C.Royère



Contexte environnemental et énergétique.

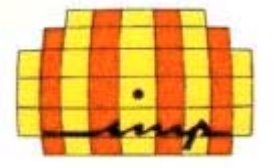


La source d'énergie primaire Solaire

La concentration solaire: Tower and CPCs

(Kribus et al., 1998)

C. Royère



Contexte environnemental et énergétique.

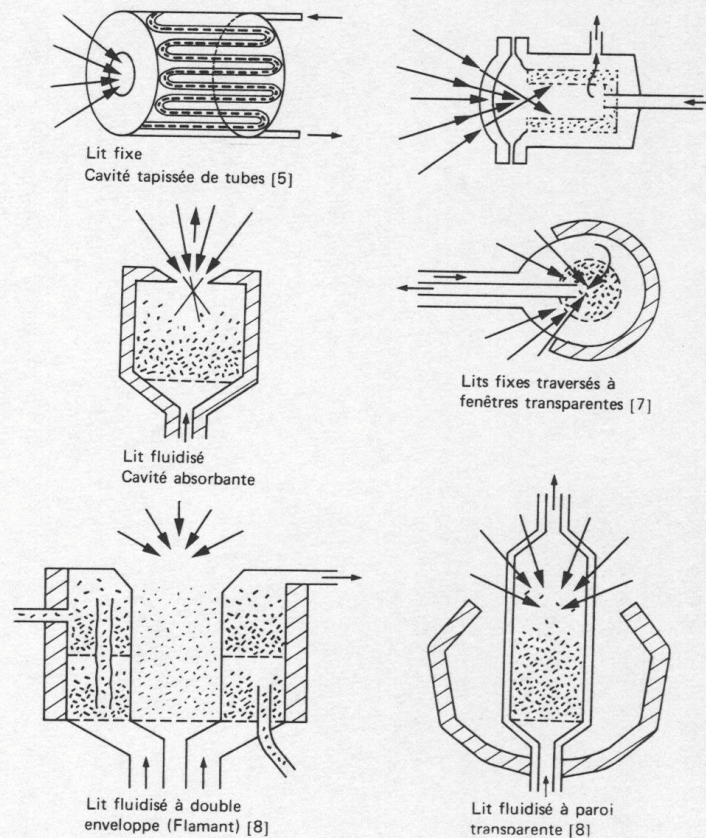
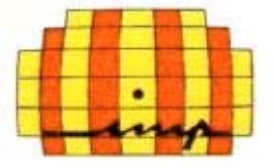


Fig. 6 Schéma de principe de réacteurs solaires gaz-solide.

La source d'énergie primaire solaire

les réacteurs solaires (Villermaux, 1979)

C. Royère



Contexte environnemental et énergétique.

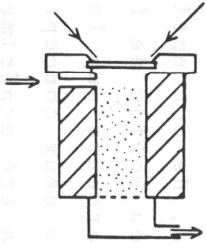
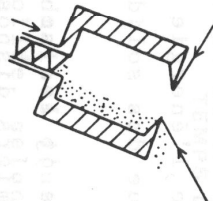
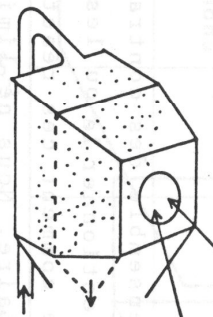
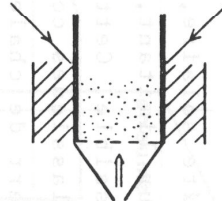
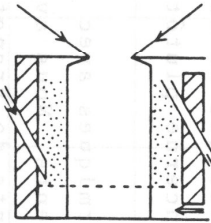
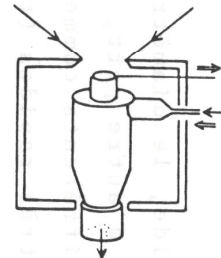
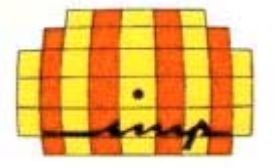
	LIT FIXE	FOUR ROTATIF	FILM TOMBANT	LIT FLUIDISE	CYCLONE	
						
TEMPERATURE	800-1000° C	700-1300° C	700-1000° C	500-1100° C	600-1000° C	800-1000° C
OBJECTIFS	Gazéification	stockage thermique, décarbonatation minérallurgie	pyrolyse stockage thermique	chauffage gaz décarbonatation	chauffage gaz stockage thermique décarbonatation	pyrolyse bois
REFERENCE	GREGG et Col./26 TAYLOR et Col./27/ QUELARD/28/	FLAMANT et Col/29/ ROYERE/30/ BADIE et Col/31/	ANTAL et Col/32/ FALCONE et Col/3/	FLAMANT/38/	FORO/40/	LEDE et Col/41/

Figure 93 : Réacteurs solaires gaz-solide expérimentés ou proposés.

La source d'énergie primaire solaire
les réacteurs solaires (Flamant 1985)

C. Royère

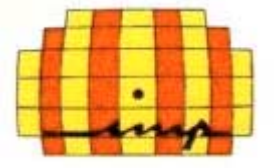


Contexte environnemental et énergétique.

	Primary ID	Name for cycle	List of	Class	#step	Max	# of elements
1	195	LASL (US) CO ₂ cycle	C	T	2	2300	1
2	107	H ₂ O direct splitting Ecole Polyt. ,Montreal, Canada, CNRS, Odeillo, France, NCL for Ind., Tokyo, Jap	nothing,	T	1	2250	0
3	7	Iron Oxide (Muravlev, USSR; Nakamura, Japan, 1976; CNRS, Odeillo, Ecole Polyt. Montreal)	Fe	T	2	2200	1
4	6	Zn/ZnO Ecole Polytechnique, Montreal, Canada, CNRS, France, Bilgen,Ducarroi and Batelle M.I.	Zn	T	2	2200	1
5	194	M/MO Cycles Ecole Polyt. ,Montreal, Canada, CNRS, Odeillo, France, LASL, IGT	M	T	2	2000	1
6	168	Organisation Control Services Inc. Ann Arbor Bromine cycles	Cr,Mn,Br	T	5	2000	3
7	33	Gaz de France (France) Souriau 1972 (aband. 1976)	Sn	T	3	1700	1
8	189	Sulfates MSO ₄ / MO hybrid LASL,IGT, JRC, CNRS	M,S	H/T	3	1600	2
9	165	CNRS, France, Cheynet,B. Fe/Br (1975, aband. 1977)	Fe,Br	T	3	1530	2
10	15	General Atomic (US) Fe ₃ O ₄	Fe,Na	T	3	1470	2
11	18	Euratom 1970 De Beni JRC Ispra (Italy) KFA Fe ₃ O ₄ Carbon-Iron	C,Fe	T	3	1400	2
12	146	Julich RWT Aachen Univ. (West Germany) Fe-Cl	Fe,Cl	T	3	1300	2
13	154	Organisation Control Services Inc. Ann Arbor Chlorine cycles	Eu,Y,Cl	T	4	1300	3
14	183	ORNL, Oak Ridge	Ce,Ti,Na	T	3	1250	3
15	178	ORNL, Oak Ridge	Fe,M	T	3	1250	2
16	5	IGT (US) Cd/CdO Pangborn (1976) Cadmium Cycle L-2	Cd	H	3	1200	1
17	115	University of Kentucky Zn/Ba cycle	Zn,Ba,S	T	4	1150	3
18	191	IGT Chicago (US) H-5 , Hybrid	Cu,S	H	4	1100	2
19	147	West Germany (Rheinische Braunkohlenwerke,A.G.,Cologne) FeCl cycle	Fe,Cl	T	3	1050	2
20	158	Julich RWT Aachen Univ. (West Germany) Fe-Cl (1971, aband. 1978)	Fe,Cl	T	5	1050	2
21	157	Julich RWT Aachen Univ. (West Germany) Fe-Cl (1972, aband. 1978)	Fe,Cl	T	5	1050	2
22	184	LASL (US) NaMnO ₂ Na-Mn Oxides (1973/1974, aband. 1975)	Na,Mn	T	4	1050	2
23	96	Julich RWT Aachen Univ. (West Germany) Fe-Cl Process	Fe,Cl	T	4	1030	2
24	60	Mark 7A Euratom JRC Ispra (Italy)	Fe,Cl	T	5	1000	2
25	9	Ispra CO/Mn ₃ O ₄	C,Mn	T	3	1000	2
26	153	LASL (US) Ce/Cl cycle	Ce,Cl	T	4	1000	2
27	63	IGT A-2 (US)	Fe,Cl	T	5	1000	2
28	2	Nickel Ferrite NiFeMn	Fe,Ni,Mn	T	2	1000	3
29	77	Tokyo Institute of Technology Ferrite	Fe,Mn,Na,C	T	2	1000	4
30	110	Sulfates BaSO ₄ Complex Oxide-Sulfate LASL, M.G.Bowman	Ba,Mo,S	T	3	1000	3

Les cycles au-dessus de 850 °C

C.Royère

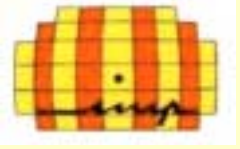


Contexte environnemental et énergétique.

	Primary ID	Name for cycle	List of	Class	#step	Max	# of elements
31	105	Kyushu Univ. (Japan) Sb-I Hybrid Cycle	Sb,I	H	3	1000	2
32	61	Mark 7B Euratom JRC Ispra (Italy)	Fe,Cl	T	5	1000	2
33	113	Julich RWT Aachen Univ. (West Germany) H ₂ SO ₄ /CH ₄ cycle	C,S	T	4	1000	2
34	108	Sulfates CdSO ₄ Julich KFA (Kernforschungszentrum Karlsruhe) Barnert,H. and Schulten,R.	Cd,S	T	2	1000	2
35	162	Japan Atom. Energy Res. Inst. MFe/C/Cl Process	Fe,C,Cl	T	5	1000	3
36	34	Miura (Japan) Sb,I	Sb,I	T	3	1000	2
37	188	Julich KFA (Kernforschungszentrum Karlsruhe) / Methane Process Hybrid process	C	H	3	1000	1
38	161	Japan Atom. Energy Res. Inst. Mn/C/Cl Process	Mn,C,Cl	T	5	1000	3
39	173	IGT, Chicago (US) Iron-Carbon Oxide (1959, aband.)	Fe,C	T	5	1000	2
40	28	LASL (US) Li ₂ O.Mn ₂ O ₃	Li,Mn	T	3	1000	2
41	67	National Chemical Lab. for Ind. (Japan) Mgl/S cycle	S,I,Mg	T	5	995	3
42	169	ORNL, Oak Ridge	Ce,Na,P,C	T	3	950	4
43	76	Hitachi (Japan) Ammonia-I Family Cycle	Cu,Cl,S,N	T	6	950	4
44	13	Westinghouse (US) Hybrid Sulfur, S Cycle, GA-22, Ispra Mark 11	S	H	2	950	1
45	30	THEME S-3 39 (US)	I,S	T	3	950	2
46	43	Sulfates FeSO ₄ _ 3 IGT C-5 (US)	Fe,S	T	4	950	2
47	64	IGT 1969 (US)	Fe,C	T	5	950	2
48	185	ORNL, Oak Ridge	Ba,Cu,F	T	5	950	3
49	39	Mark 13 Mark S,Br Hybrid Euratom JRC Ispra (Italy)	S,Br	H	3	950	2
50	95	Mark 16 Euratom JRC Ispra (Italy) see General Atomic (US) Sulfur-Iodine	S,I	T	3	950	0
51	111	LASL H ₂ SO ₄ /S cycle see General Atomic Cycle 23 S	S	T	4	950	1
52	46	LASL (US) CrBr ₃	Br,Cr,S	T	4	950	3
53	58	LASL (US) S-Bi Bismut sulfate Cycle up to 1250 °C	S,Bi	H	4	950	2
54	57	Mark 11 Mark S Hybrid Euratom JRC Ispra (Italy)	S	H	4	950	1
55	79	General Atomic Cycle 23 S	S		5	950	1
56	1	General Atomic (US) Sulfur-Iodine, Iodine Sulfur, Ispra Mark 16	I,S	T	3	950	2
57	65	West Germany (Rheinische Braunkohlenwerke,A.G.,Cologne)	Fe,S,C	T	5	950	3
58	141	Univ. Of Tokyo Ni	I,Ni,Br,S	T	6	930	4
59	70	Sulfates ZnSO ₄ LLL (US)	Zn,Se,S,Cl	T	5	930	4
60	102	UK No 8 Process / Univ. Ken.	Fe,Ba,S	T	4	930	3

Les cycles au-dessus de 850 °C

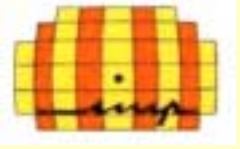
C.Royère



Contexte environnemental et énergétique.

	Primary ID	Name for cycle	List of	Class	#step	Max	# of elements
61	135	National Chemical Lab. for Ind. (Japan) NCL-3	S,I,M	T	4	925	3
62	99	Japan Atom. Energy Res. Inst. II-J process FeI2-CO2 Process	Fe,I,S,C	T	5	900	4
63	196	West Germany (Rheinische Braunkohlenwerke,A.G.,Cologne) FeCl cycle Schulten,R.M.	C,S	T	3	900	2
64	27	Mark 8 Euratom JRC Ispra (Italy)	Mn,Cl	T	3	900	2
65	112	National Chemical Lab. for Ind. (Japan) Hydrogen Sulfide Cycle	S	T	4	900	1
66	181	ORNL, Oak Ridge	Cr,K	T	3	900	2
67	109	Sulfates FeSO4 _ 4 IGT (Chicago) C-7 (US) Pangborn,J.	Fe,S	T	3	900	2
68	104	National Chemical Lab. for Ind. (Japan)	S,I	H	3	900	2
69	114	Agency of Ind. Science and Technology, Tokyo, Ge,S,Co cycle Takeuchi,N.	Ge,S,Co	T	4	900	3
70	174	West Germany (Rheinische Braunkohlenwerke,A.G.,Cologne) FeCl cycle	C,S	T	5	900	2
71	47	Mark 1C Euratom JRC Ispra (Italy)	Ca,Cu,Br	T	4	900	3
72	71	Mark 5 Euratom JRC Ispra (Italy)	Ca,Br,Hg,C	T	5	900	3

Les cycles au-dessus de 850 °C



Contexte environnemental et énergétique.

A. Steinfeld / International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 611–619

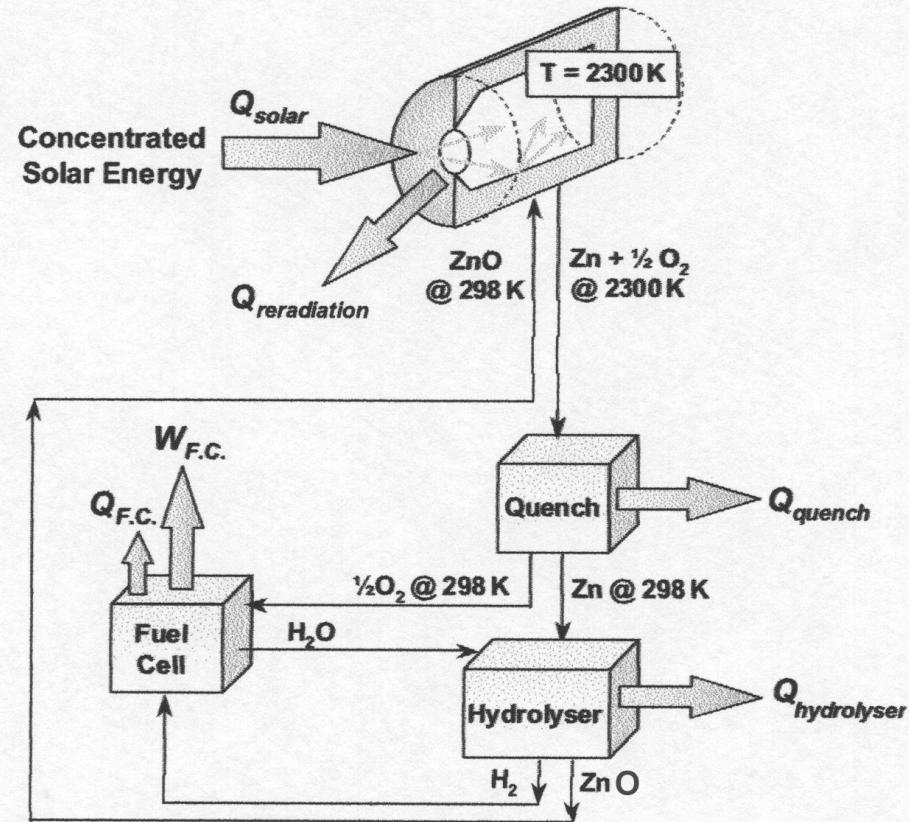
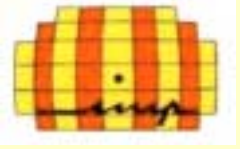
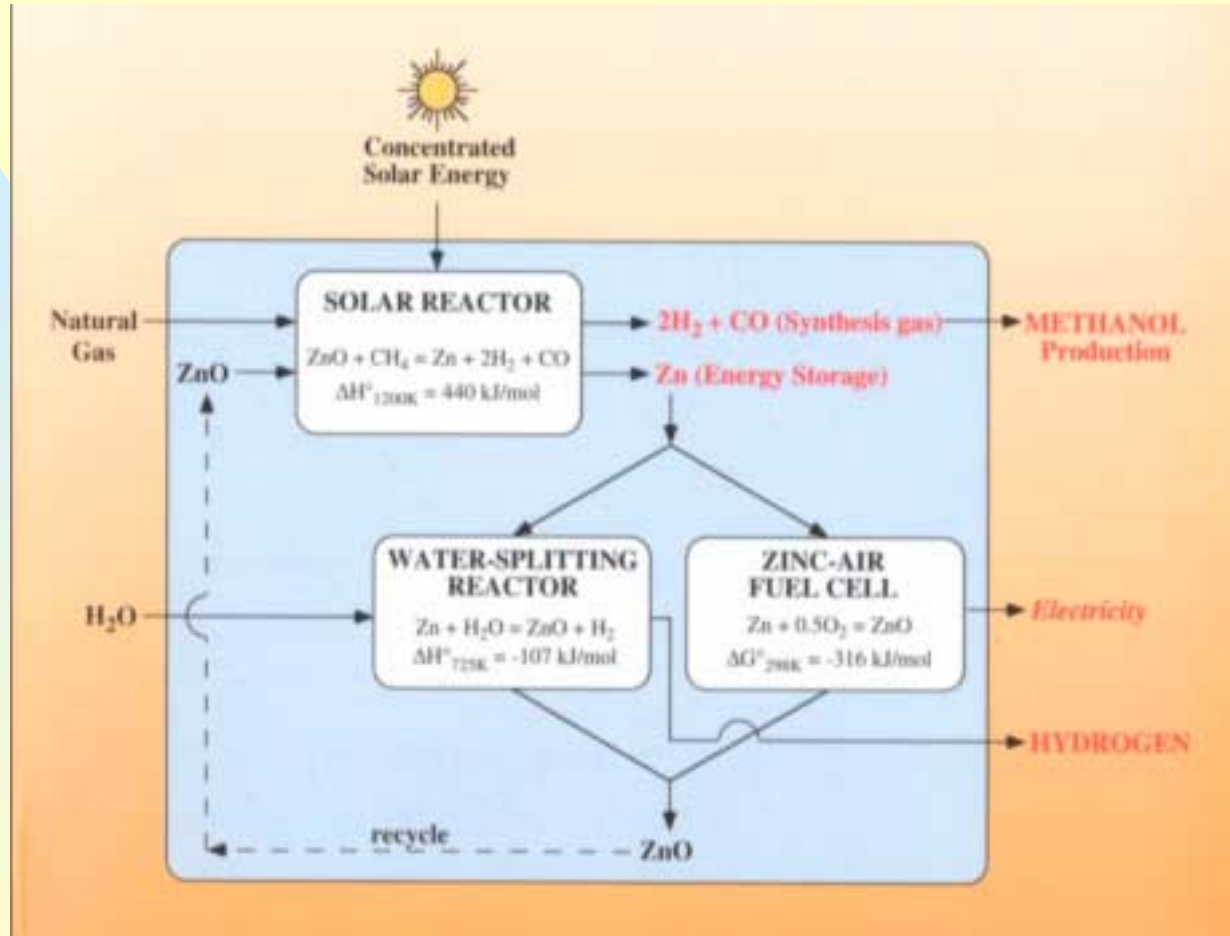


Fig. 1. Model flow diagram of the water-splitting solar thermochemical cycle used for the exergy analysis.

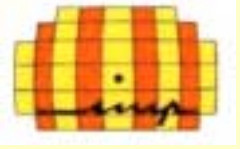
Les cycles “prometteurs” pour l’énergie primaire solaire
les cycles à 2 étapes
Steinfeld, 2002
C. Royère



Contexte environnemental et énergétique.



Les cycles “prometteurs”
pour l’énergie primaire solaire: les mixtes



Contexte environnemental et énergétique.

- **Solar UT-3**

- ♦ Sakurai, Bilgen, 1996

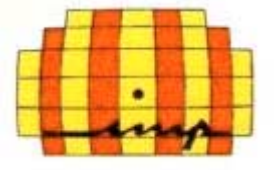
- **Solar I-S cycle**

- ♦ Solar CRISTINA process : Bilgen, Broggi, 1986

- ♦ New process for O₂ generating step : Öztürk, Bilgen, 1994-1995

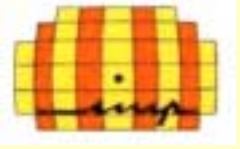
**Les cycles “prometteurs” pour l’énergie primaire solaire:
les cycles à plus de 2 étapes**

C. Royère

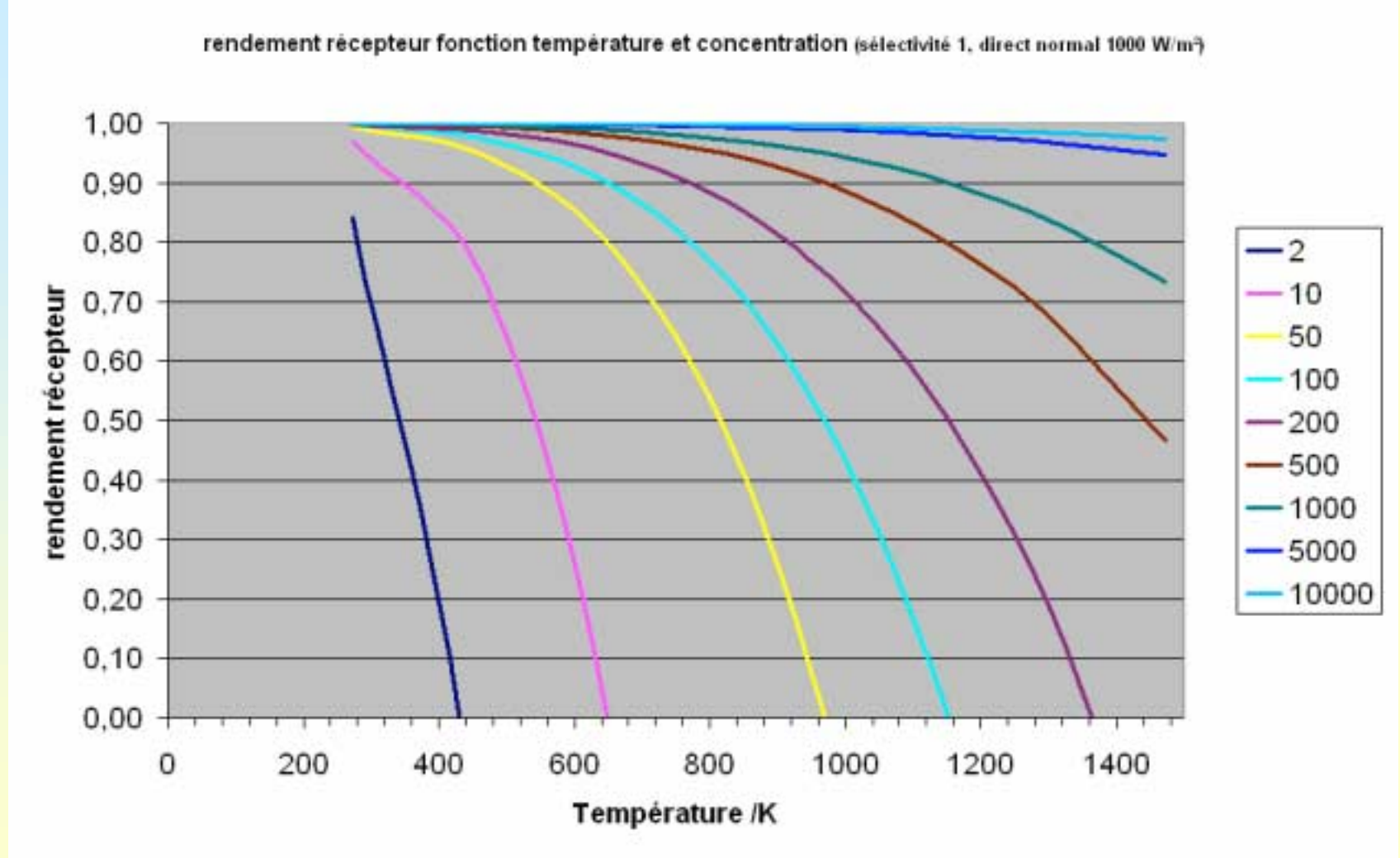


"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

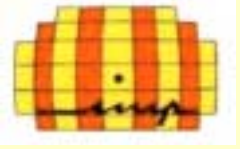
- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement. **!**
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?
- ❑ Contexte économique.
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener.



Chaleur primaire solaire, température et rendement.

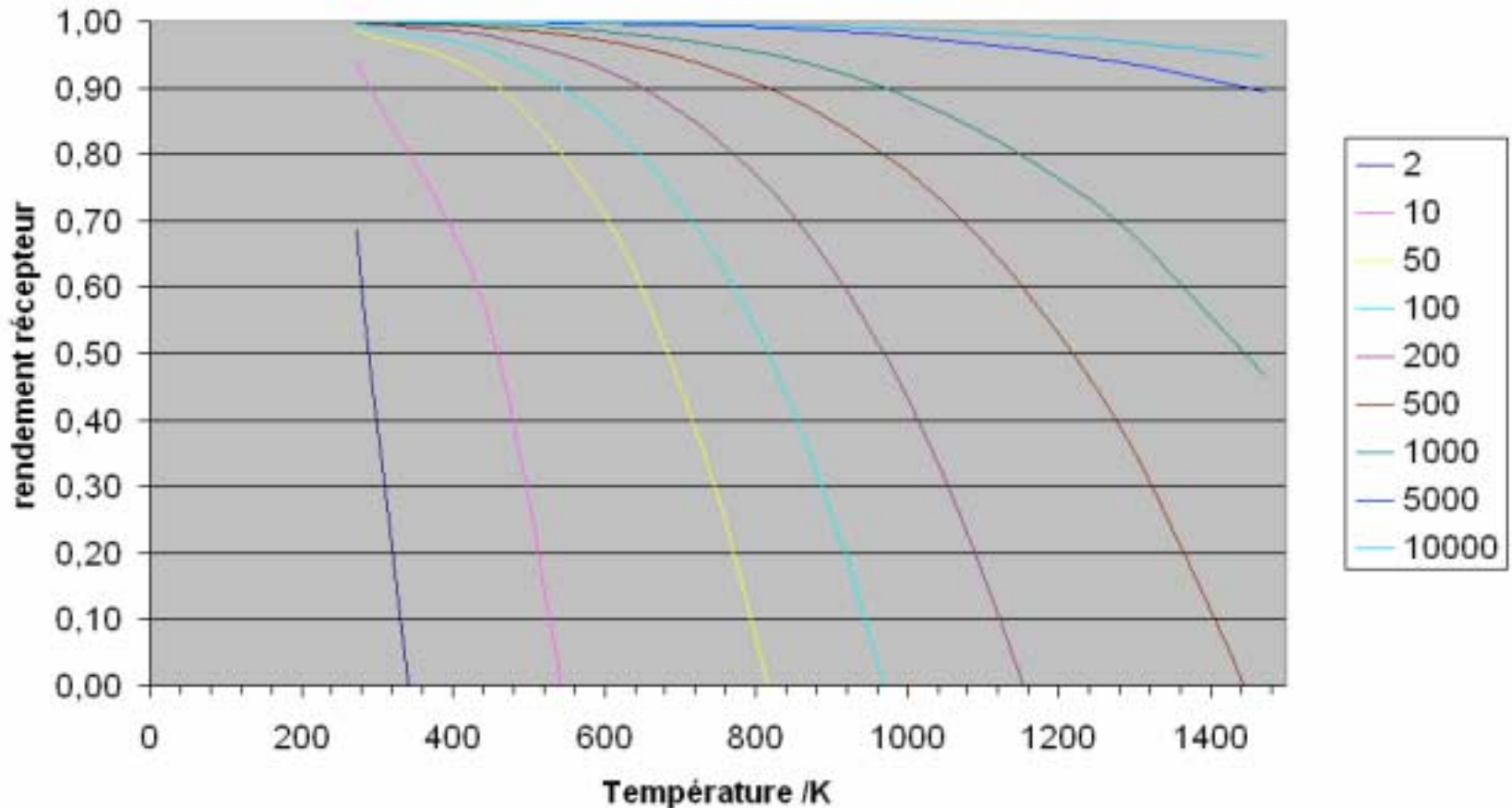


Rendement récepteur-température- concentration

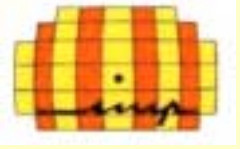


Chaleur primaire solaire, température et rendement.

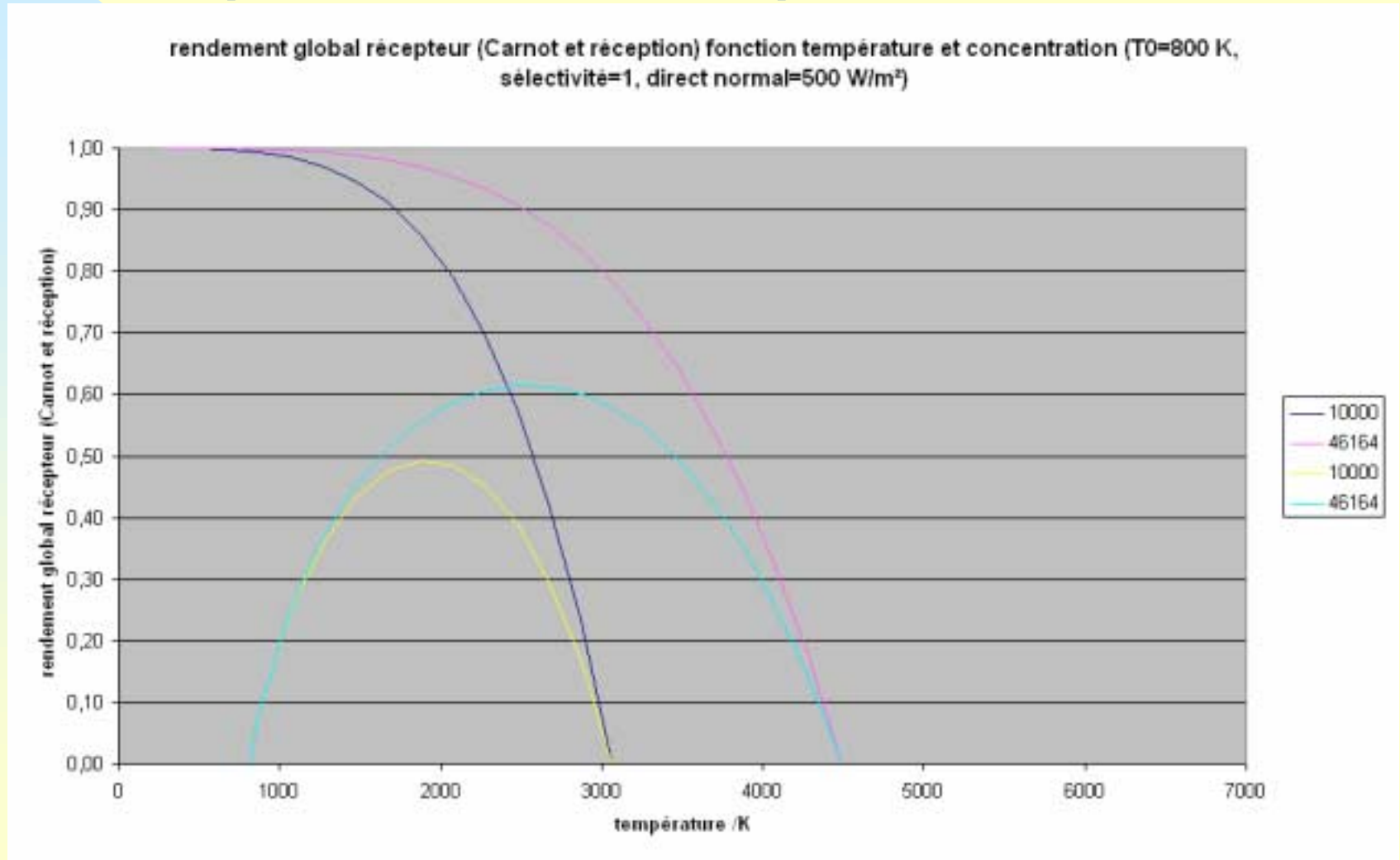
rendement récepteur fonction température et concentration (sélectivité 1, direct normal 500 W/m^2)



Rendement récepteur température- concentration

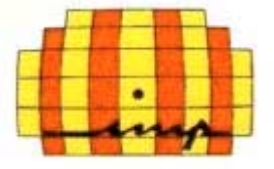


Chaleur primaire solaire, température et rendement.



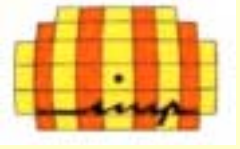
Rendement global

C.Royère



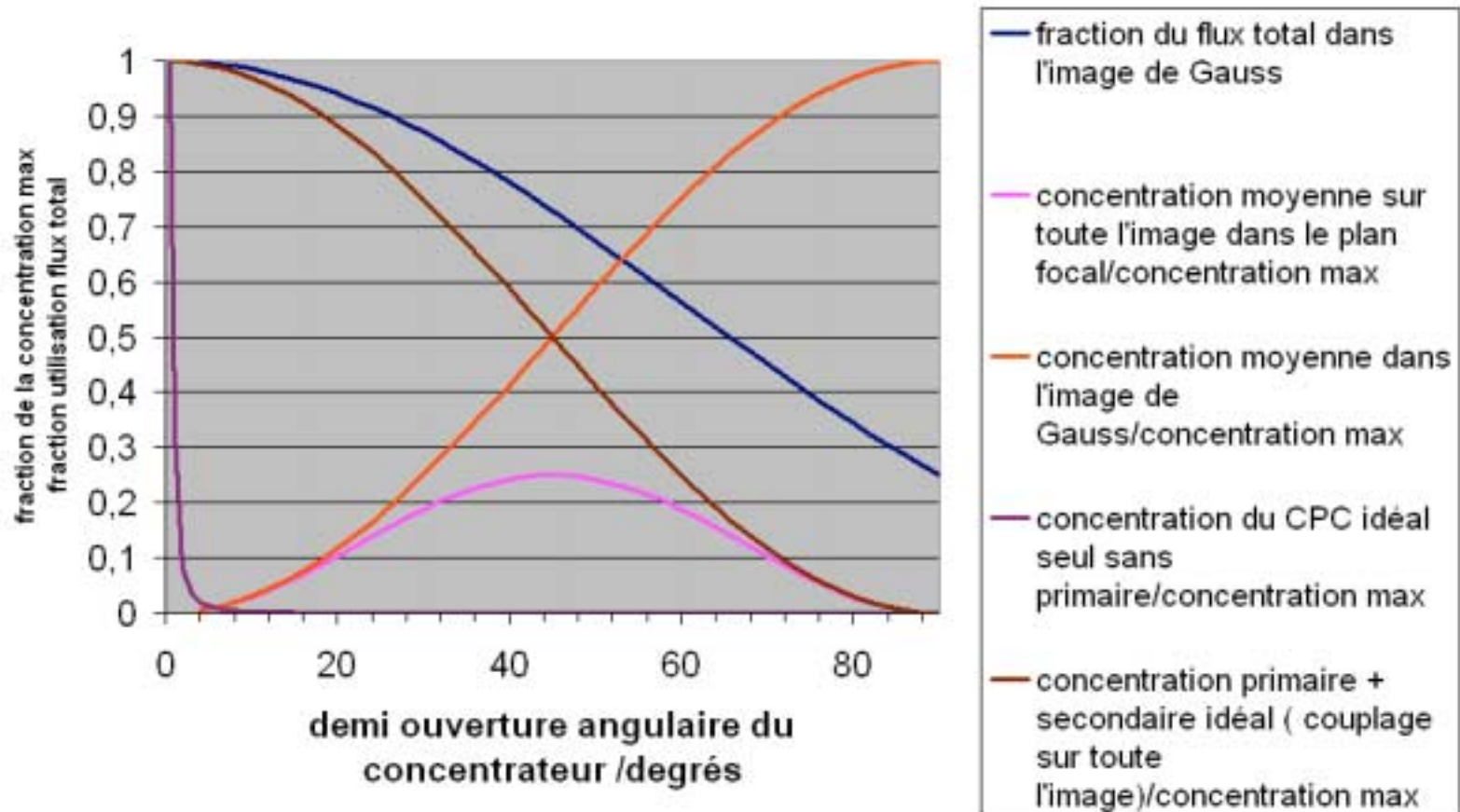
"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires. !
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?
- ❑ Contexte économique.
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener.



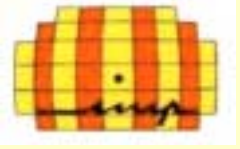
Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.

concentrateur parabolique et CPC



Primaire parabolique et secondaire CPC

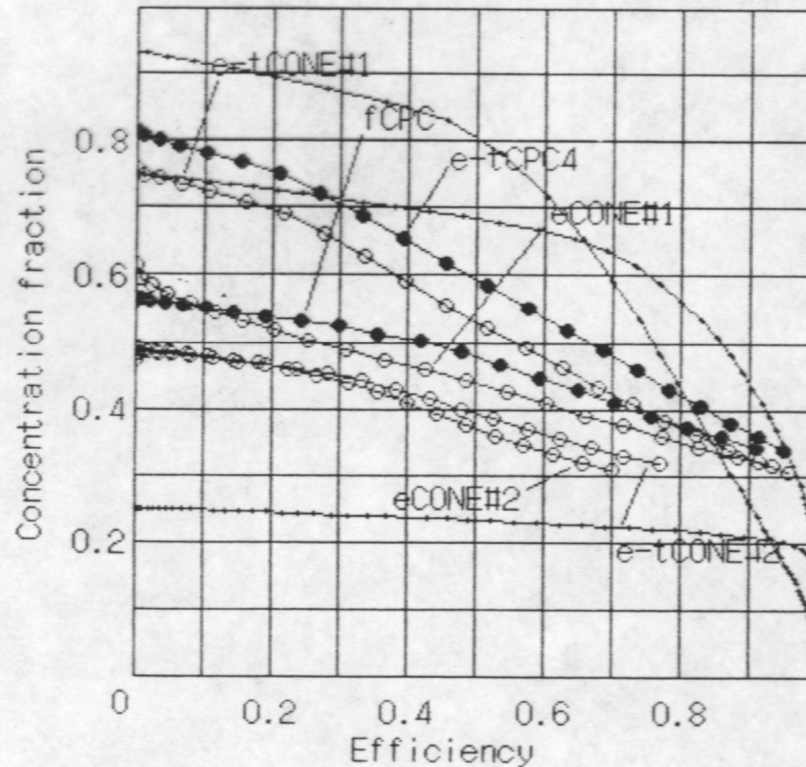
C. Royère



Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.

1.944 Gauss image

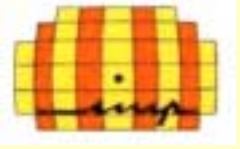
refl. = 0.9



C.ROYERE, A.SUZUKI, SFT, 1993

Primaire parabolique + secondaire CPC

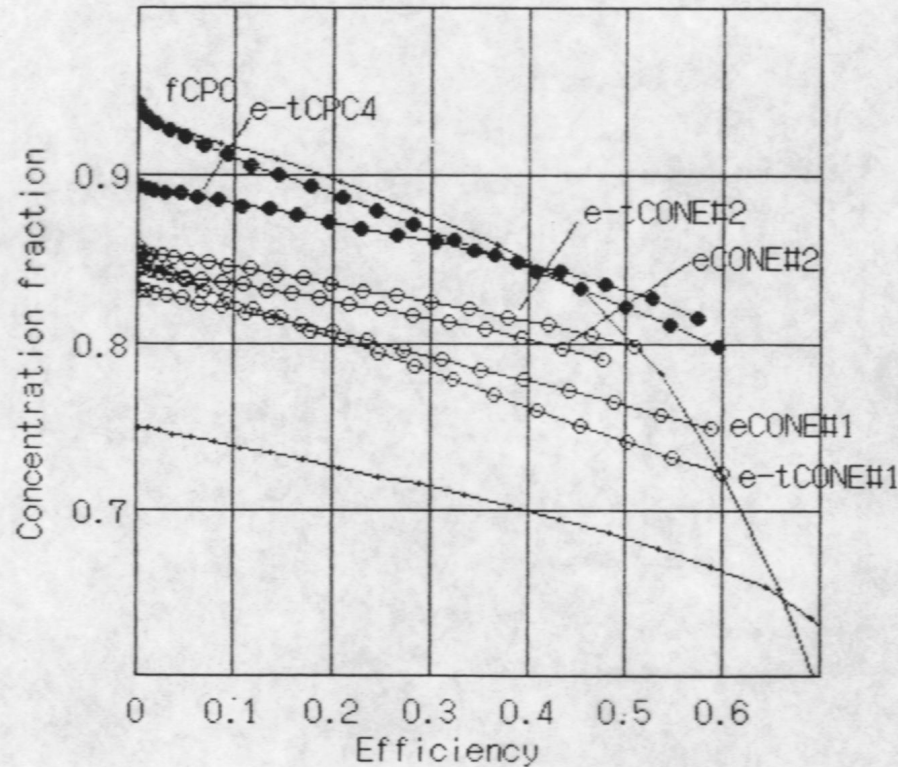
C.Royère



Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.

1 Gauss image

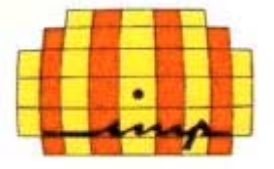
refl. = 0.9



C.ROYERE, A.SUZUKI, SFT, 1993

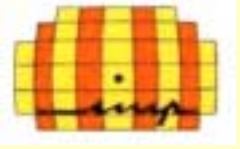
Primaire parabolique + secondaire CPC

C.Royère



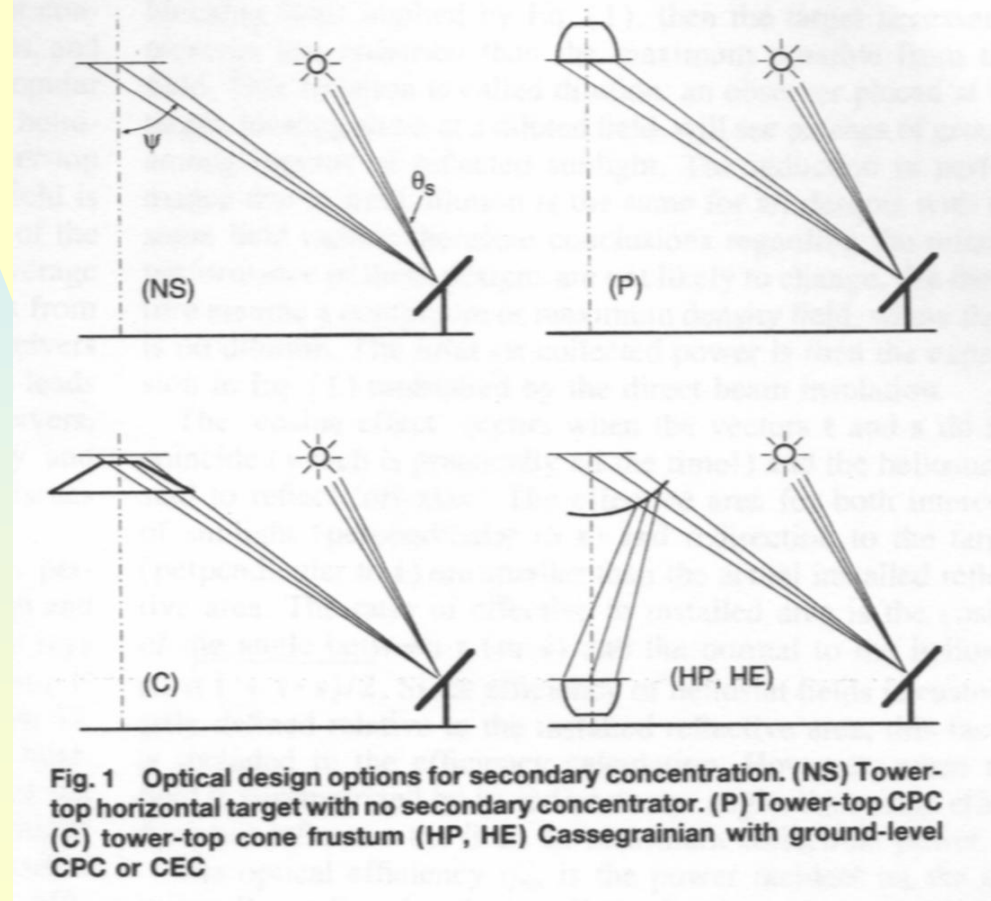
"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours !
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?
- ❑ Contexte économique.
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener.



Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

A. KRIBUS et al. J. Sol. En. Eng. Trans ASME, 1998



Primaire + secondaire versus primaire
Tower and CPCs (Sce: Kribus et al. 1998)

C. Royère

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

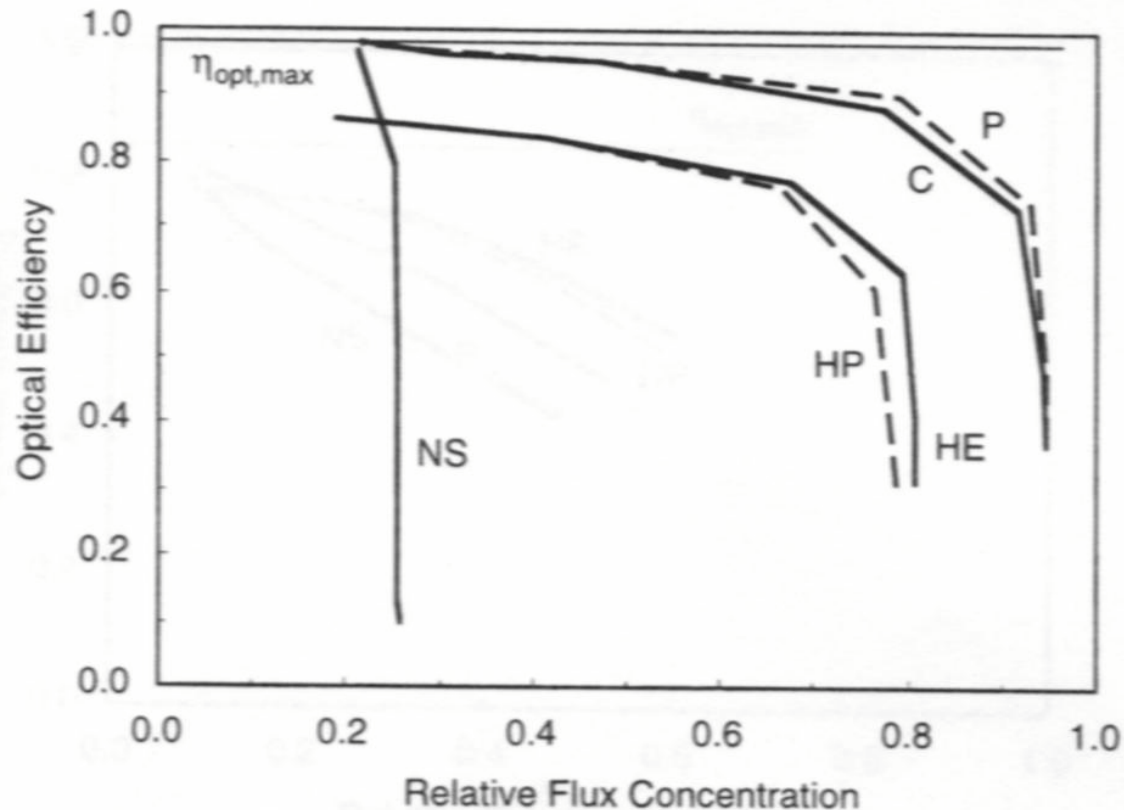


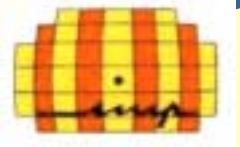
Fig. 2 Characteristic curves for no secondary (NS), cone (C), CPC (P), Cassegrainian with CPC (HP) and Cassegrainian with CEC (HE), for a field rim angle of $\psi = 30^\circ$ (field radius 0.577, maximum collection efficiency $\eta_{opt,max} = 0.982$)

Primaire + secondaire versus primaire

(Sce: Kribus et al. 1998)

C. Royère

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.



A. KRIBUS et al. J. Sol. En. Eng. Trans ASME, 1998

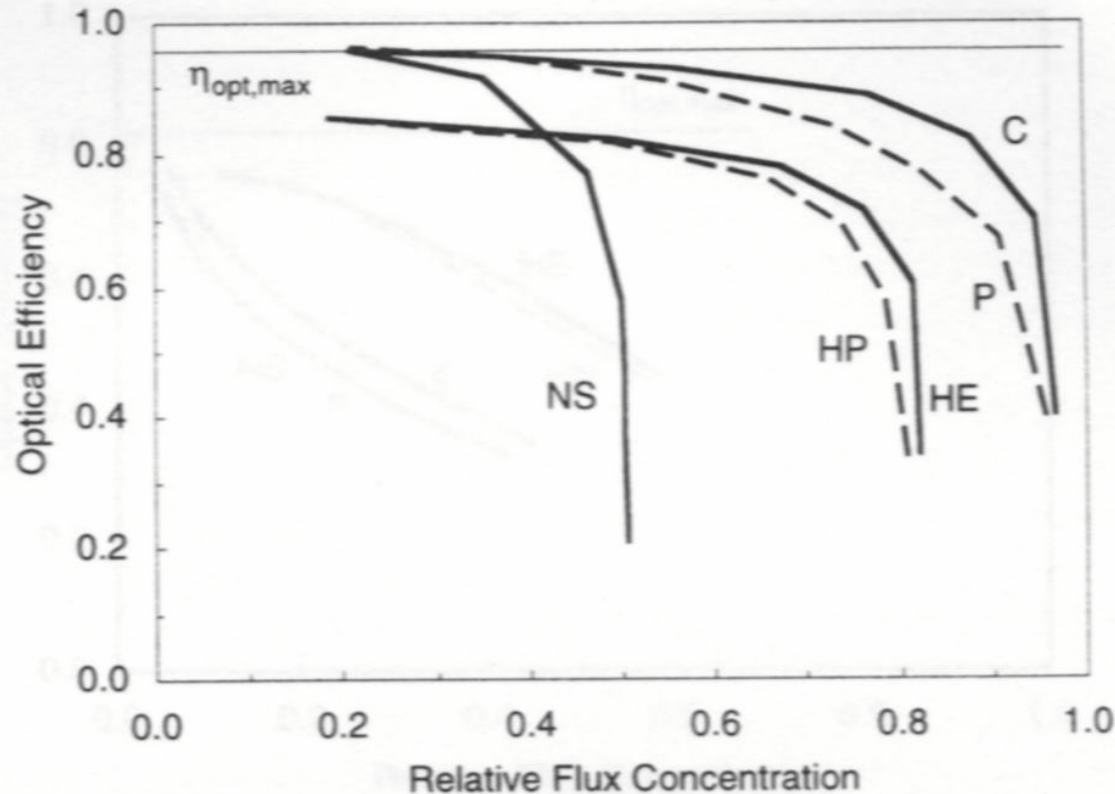


Fig. 3 Characteristic curves for no secondary (NS), cone (C), CPC (P), Cassegrainian with CPC (HP) and Cassegrainian with CEC (HE), for a field rim angle of $\psi = 45^\circ$ (field radius 1, $\eta_{opt,max} = 0.958$)

Primaire + secondaire versus primaire
(Sce: Kribus et al. 1998)

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

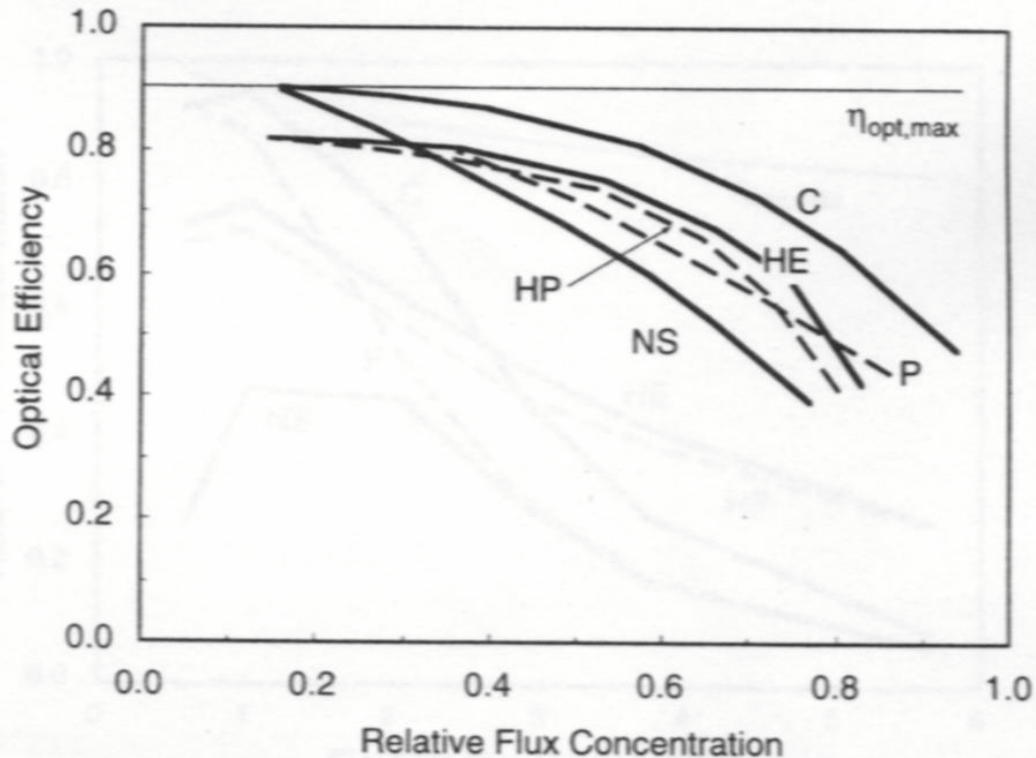
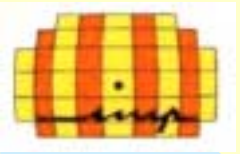


Fig. 4 Characteristic curves for no secondary (NS), cone (C), CPC (P), Cassegrainian with CPC (HP) and Cassegrainian with CEC (HE), for a field rim angle of $\psi = 64^\circ$ (field radius 2.05, $\eta_{opt,max} = 0.904$)

A. KRIBUS et al. J. Sol. En. Eng. Trans ASME, 1998

Primaire + secondaire versus primaire
(Sce: Kribus et al. 1998)

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

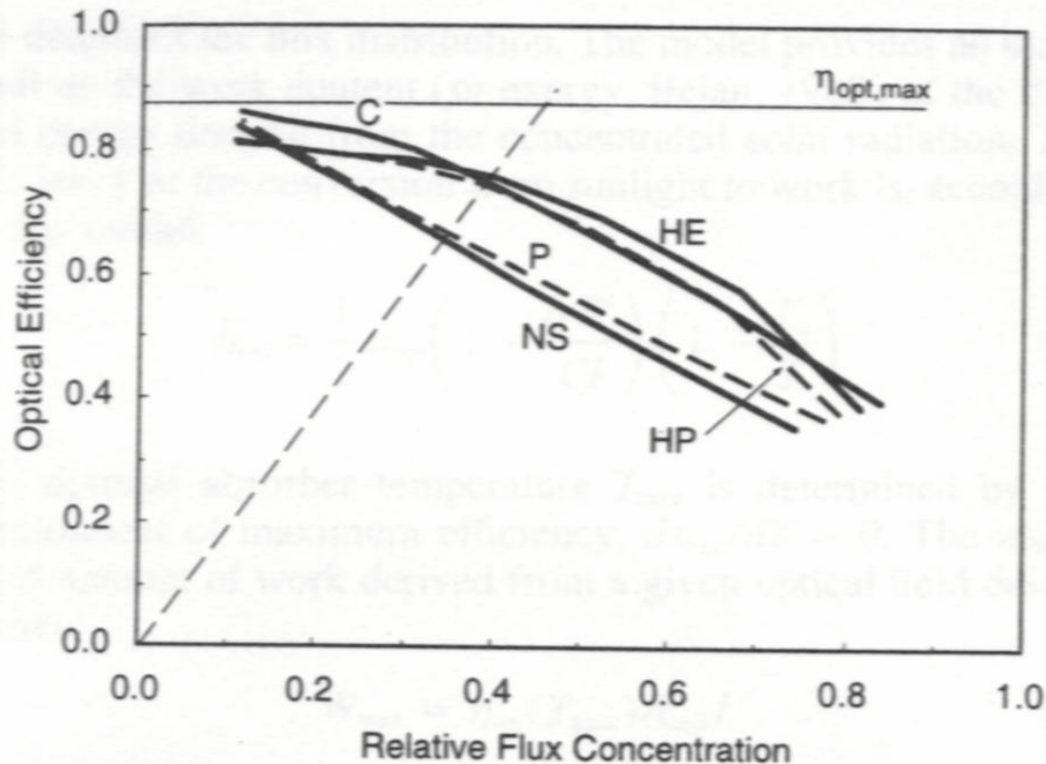
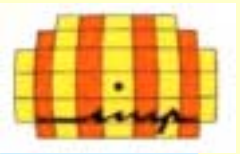


Fig. 5 Characteristic curves for no secondary (NS), cone (C), CPC (P), Cassegrainian with CPC (HP) and Cassegrainian with CEC (HE), for a field rim angle of $\psi = 71^\circ$ (field radius 2.90, $\eta_{opt,max} = 0.874$). The dashed line indicates the example in section 4 with $R_A = 0.03$

Primaire + secondaire versus primaire
(Sce: Kribus et al. 1998)

C.Royère

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

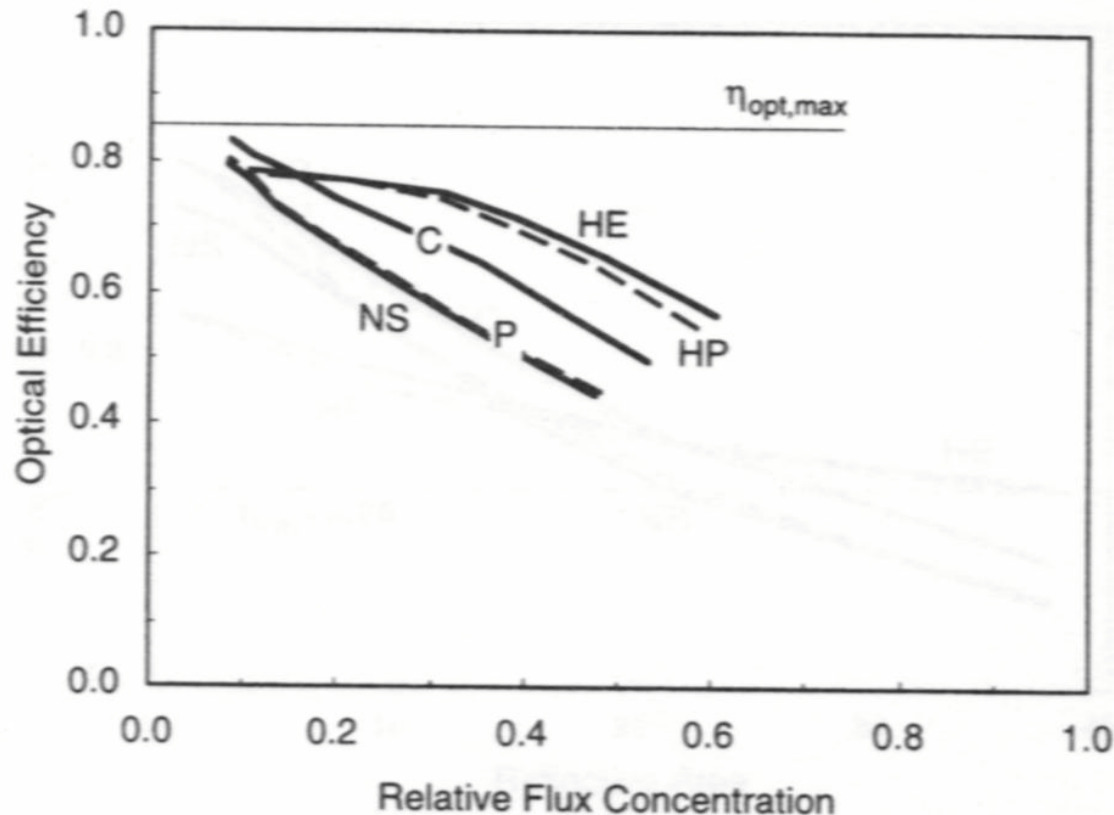


Fig. 6 Characteristic curves for no secondary (NS), cone (C), CPC (P), Cassegrainian with CPC (HP) and Cassegrainian with CEC (HE), for a field rim angle of $\psi = 75^\circ$ (field radius 3.73, $\eta_{opt,max} = 0.853$)

Primaire + secondaire versus primaire

(Sce: Kribus et al. 1998)

C. Royère

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

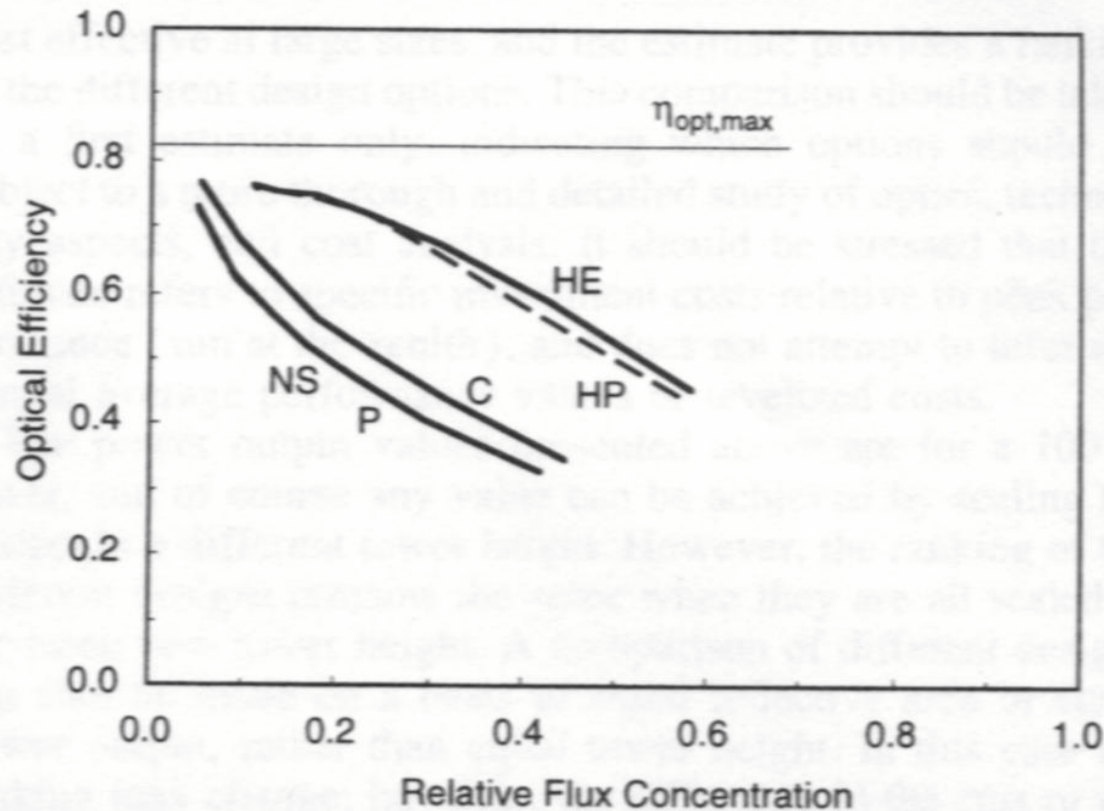


Fig. 7 Characteristic curves for no secondary (NS), cone (C), CPC (P), Cassegrainian with CPC (HP) and Cassegrainian with CEC (HE), for a field rim angle of $\psi = 80^\circ$ (field radius 5.67, $\eta_{opt,max} = 0.821$)

Primaire + secondaire versus primaire
(Sce: Kribus et al. 1998)

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

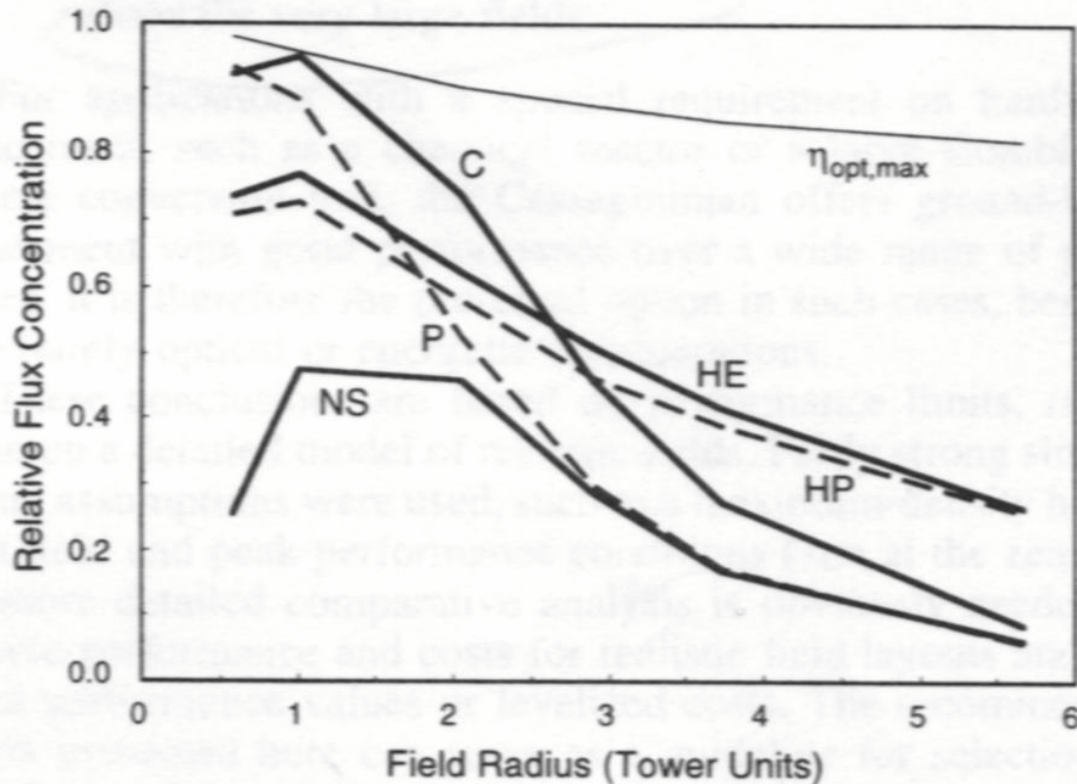
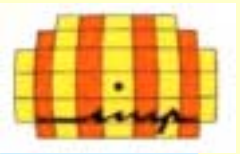


Fig. 8 Relative flux concentration at 70% efficiency vs. the field radius (in tower height units)

Primaire + secondaire versus primaire
(Sce: Kribus et al. 1998)

C.Royère

Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tour.

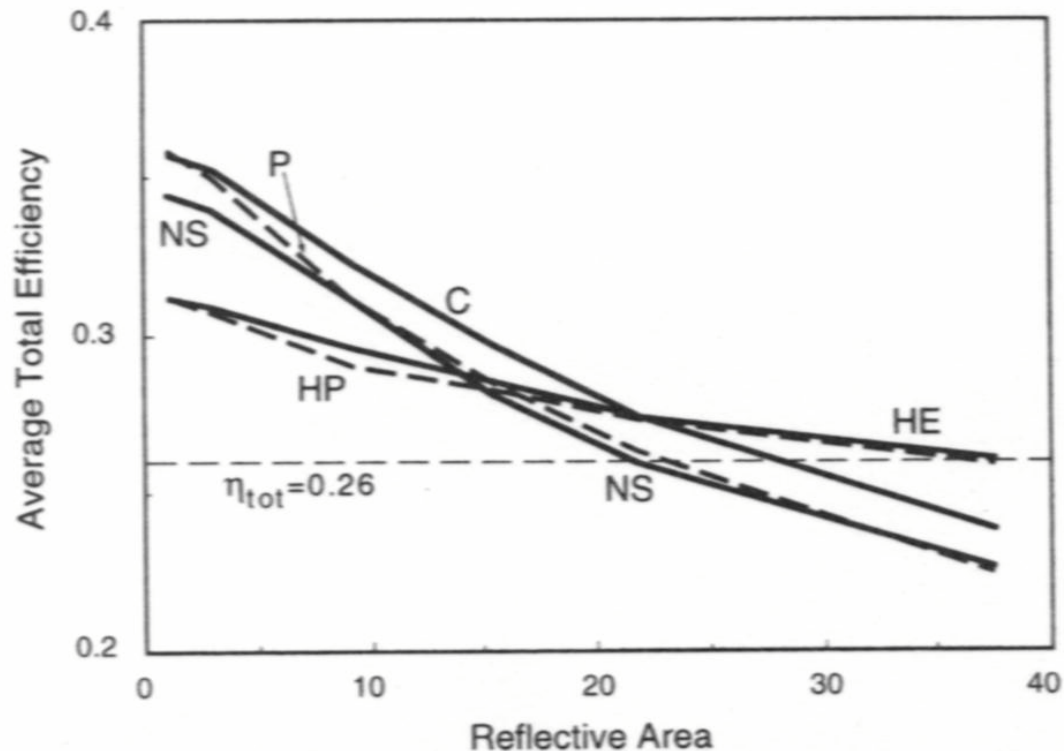
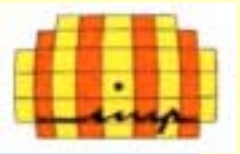
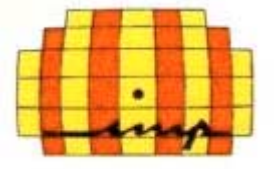


Fig. 9 Total efficiency, or work output per unit reflective area (in kW/m²) as a function of field size, assuming insolation of 1 kW/m². Reflective area is in units of tower height squared. At each point the receiver temperature is optimized separately. Dashed line: see example in section 5

Primaire + secondaire versus primaire

(Sce: Kribus et al. 1998)

C. Royère



"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur? !
- ❑ Contexte économique.
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener.

La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?

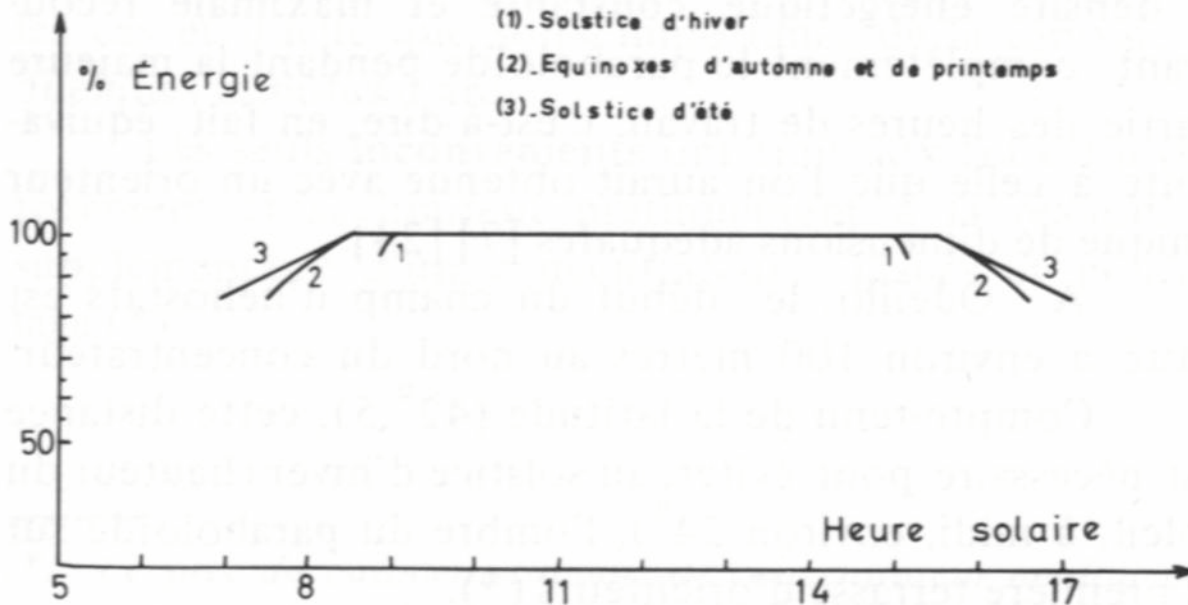


Fig. 9. Rendement énergétique, au cours de la journée de travail, du champ d'orienteurs d'Odeillo à diverses époques de l'année (d'après un document publié par F. Trombe et A. Lê Phat Vinh).

Four solaire

(Sce: C.Henry La Blanchetais, 1982)

C.Royère

La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?

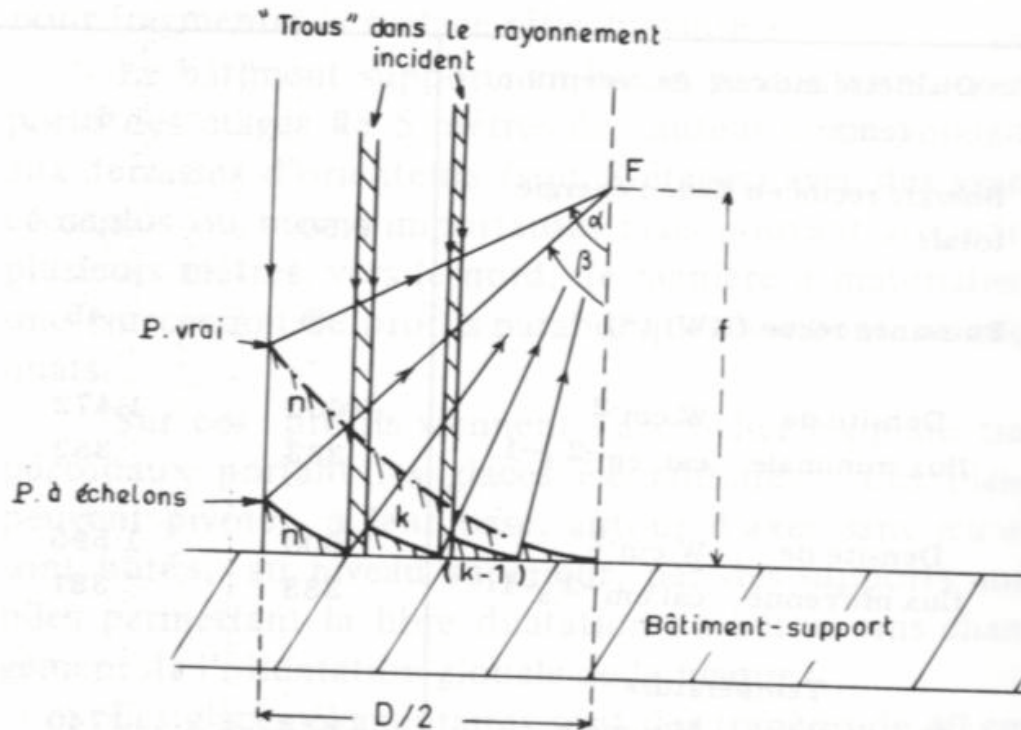
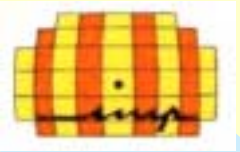
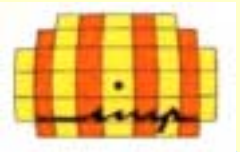


Fig. 10. Profils comparés du paraboloïde « vrai » et d'un paraboloïde « à échelons » de même distance focale. Pertes dans le rayonnement incident par suite du relèvement des plaques du paraboloïde à échelons.

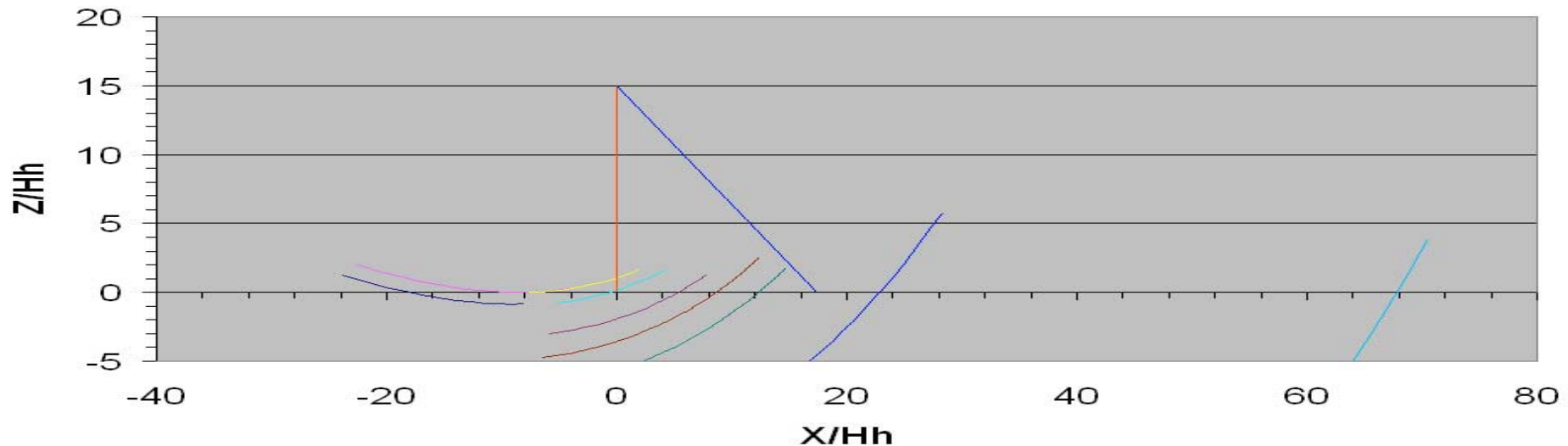
Four solaire à échelons

(Sce: C.Henry La Blanchetais, 1982)

La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?



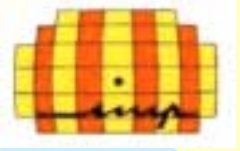
centrale de chaleur, four solaire du futur?
méridiennes (équinoxe midi solaire)



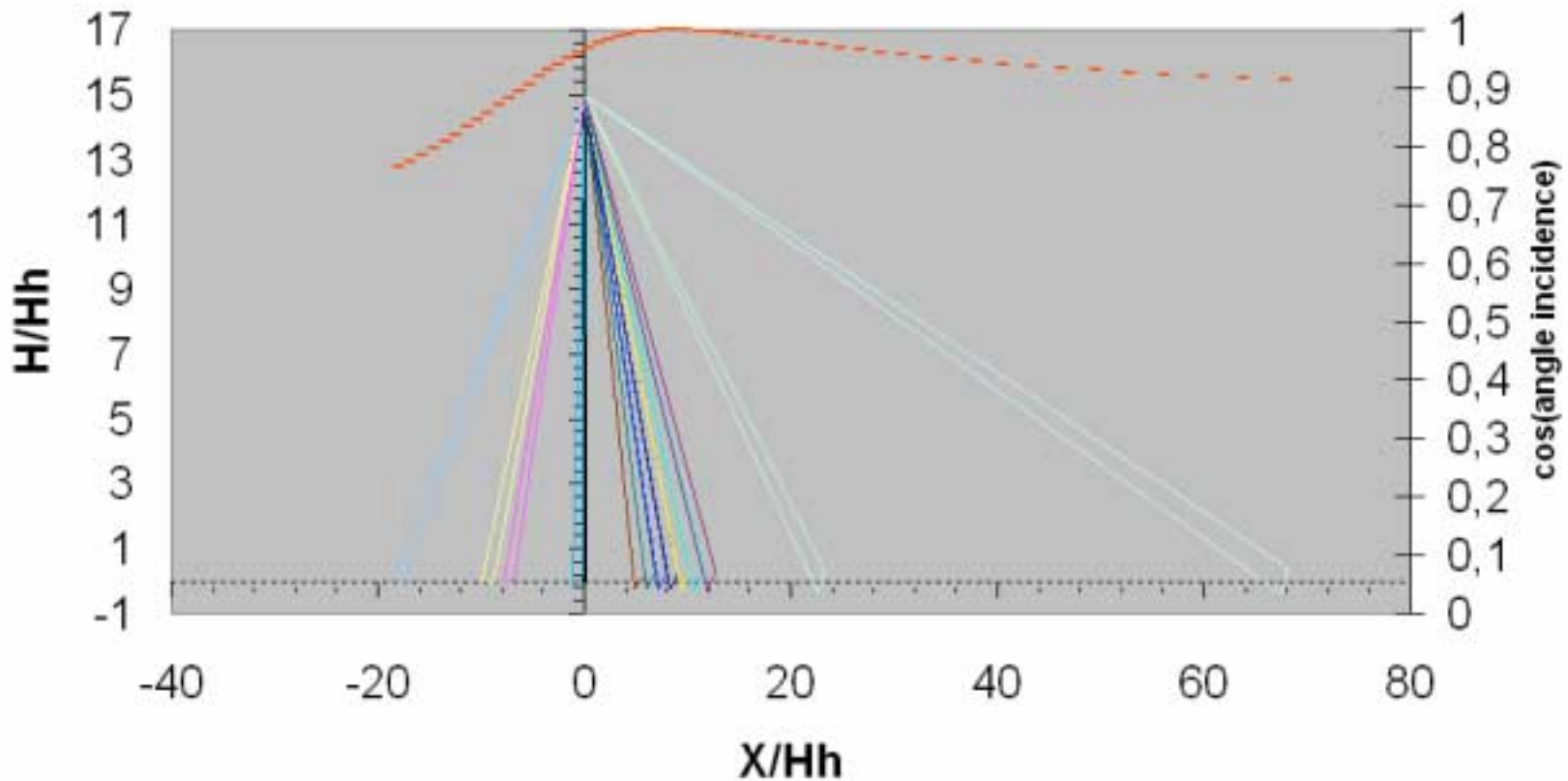
Méridienne - principe.

C. Royère

La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?



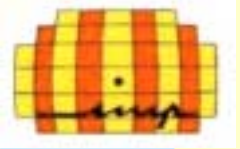
centrale de chaleur, four solaire du futur?
héliostats méridienne (équinoxe, midi solaire)



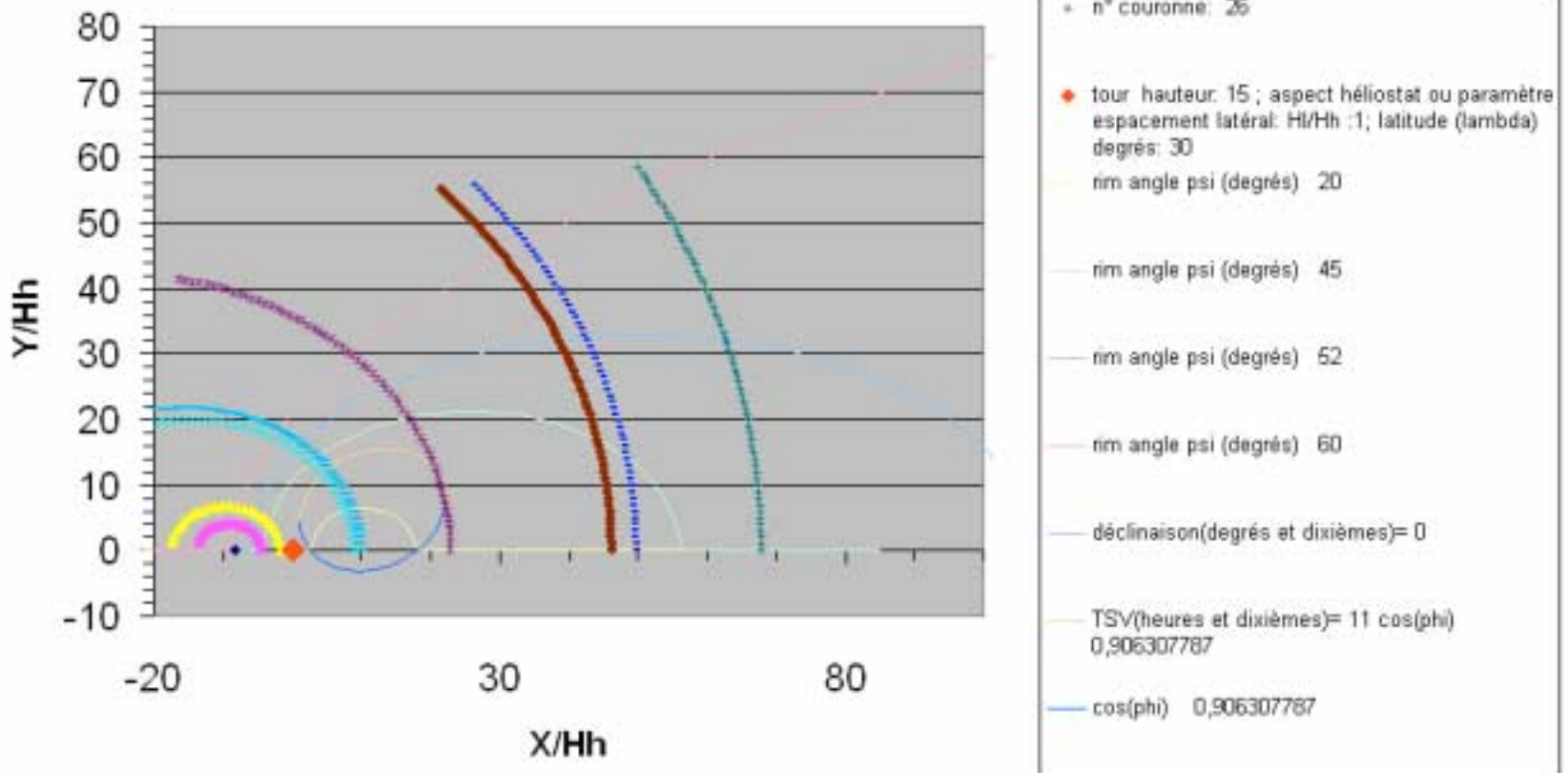
Méridienne et $\cos\Phi$.

C. Royère

La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?

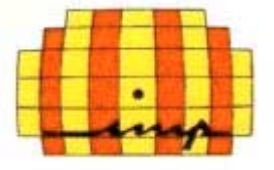


centrale de chaleur, four solaire du futur?
positionnement des héliostats au sol (équinoxe midi solaire)



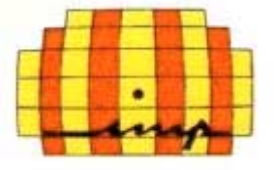
Rangées, iso Φ , iso Ψ .

C. Royère



"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?
- ❑ Contexte économique. !
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener.



Contexte économique.

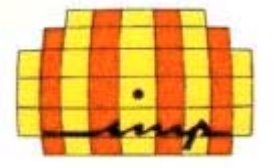
Table 2. Estimated current future nuclear electricity and hydrogen production costs

	Units	Grid electricity industrial rate	New nuclear capacity	Current electrolysis	Advanced reactor design	Advanced electrolysis
Interest rate	Per cent/year		12	12	12	12
Project lifetime	Years		20	20	20	20
Load factor	Hours/year		7 500	7 900	7 900	8 300
Capital costs	\$/kWe		2 450	600	1 120	400
Capital charges	mills/kWh		44.05	10.19	21.02	6.43
O&M costs	mills/kWh		10.33	7.61	1.15	3.60
Fuel costs	mills/kWh		7.39	110.46	3.64	38.72
Total electricity costs	mills/kWh	50	61.77 ⁽⁶⁾		25.81	
Hydrogen production costs	\$/GJ \$/bbl	25-30 140-171		30.7 175		13.5 77

⁶ Based on a 12% discount rate and 20-year project life. Nuclear generating costs drop to 40 mills/kWh and 54 mills/kWh if 5 and 10% discount rates and a 30-year project life are assumed.

Les coûts de production
(Sce :Rogner, IAEA, NEA-OCDE, 2000)

C.Royère

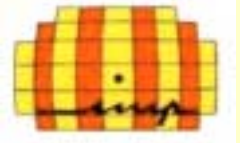


Contexte économique.

Hydrogen from renewable	0,75-10 DM/m ³	0,38-5,11 €/m ³ 35-473 €/GJ (€/m³ X 92,7 = €/GJ)
Hydrogen from hydrocarbons or coal	0,1-0,12 DM/m ³ (synthèse de l'ammoniaque) raffineries et cokeries : 0,03-0,05 DM/m ³ SR gaz naturel : 0,03-0,06 DM/m ³	0,05-0,06 €/m ³ 4,6-5,6 €/GJ 0,015-0,026 €/m ³ 1,39-2,4 €/GJ 0,015-0,03 €/m ³ 1,39-2,8 €/GJ
Hydrogen from nuclear electricity via electrolysis (baseload)	0,13-0,22 DM/m ³ 0,09-0,11 DM/m ^{3*} 0,05**	0,067-0,113 €/m ³ 6,2-10,5 €/GJ 0,046-0,056 €/m ³ 4,3-5,2 €/GJ 0,0256 €/m ³ 2,4 €/GJ
Hydrogen from thermal processes (nuclear primary energy from HTR)	< 0,12 DM/m ³ (SR gaz naturel)	0,061 €/m ³ 5,65 €/GJ
Données Stoll, 2001 : (Stoll 2001) Electrolyse : 4,5 kWh/m ³ H ₂ (futur* : 3 à 3,5 kWh/m ³) ; électricité nucléaire : 0,03-0,05 DM/kWh , rendement 30% (futur** :45%) ; électricité solaire (évaluation « optimiste ») : 0,5-2 DM/m ³ ; électricité éolienne (non subventionnée) : 0,25-0,3 DM/m ³ ; 1,95583 DM/€ ; LHV(H ₂) : 10,786 MJ/m ³ STP		
Préparé par C.Royère, Septembre 2002		

Les coûts de production (Sce :Stoll, 2001)

C.Royère



Contexte économique.

Economic assumptions span a wide range

NH2
Nuclear Hydrogen

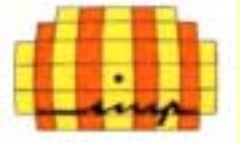
Description	GT-MHR	MHR alone	SI-H ₂ Cycle	H ₂ -MHR
Total Overnight Cost, \$M	1,290	968	504 - 1,008	1,472 - 1,976
	(\$1120/kWe)		(\$210-420/kWt)	
Operating Cost, \$M/year	127	95.3	33.6 - 67.2	128.9 - 162.5
Efficiency — production	48%			40 - 60%
— electrolysis	65 - 95%			
Electrolysis Unit Cost	\$288M-1.2B			
	(\$250-1000/kWe)			
Electricity Distribution Cost Multiplier	1.0 - 3.0			
Capital Recovery Rate	5 - 20%	5 - 20%	5 - 20%	5 - 20%
Transmission distance	0-1000 mi			0-1000 mi

Intent: Use model parametrically



Les coûts de production

(données cf fig. suiv. ; sce : GA Golden 2002)



Contexte économique.

Example of Busbar H₂ Cost Estimates

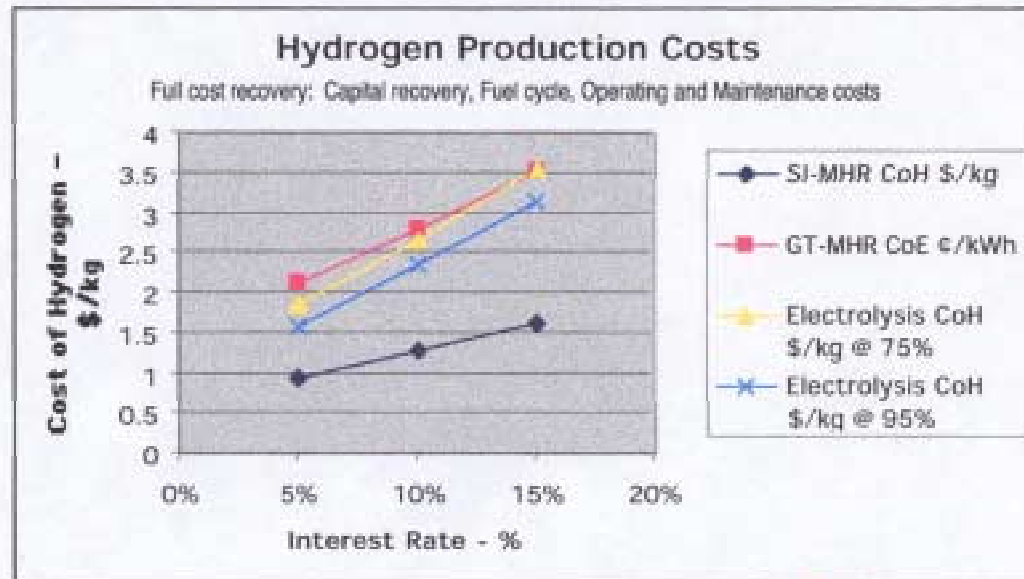
NH₂

Nuclear Hydrogen



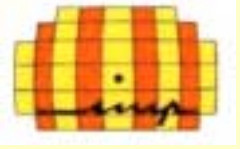
Assume median SI H₂ system cost (\$315/kWt) and efficiency (50%)

Electrolysis at Stuart Energy goal of \$250/kWe



Les coûts de production
(cf sup. ; sce : GA Golden 2002)

C.Royère

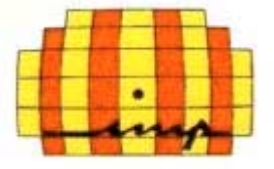


Contexte économique.

Gaudernack, 1998 (Gaudernack and Lynum 1998)	
<u>Hydrogen production costs</u>	
H ₂ from Electrolysis (Electricity 4,5 US\$/kWh)	24 US\$/GJ
CB&H	6,5 US\$/GJ
SMR + CO ₂ sequest.	7 US\$/GJ
Steinfeld, 2002 (Steinfeld 2002a)	
H ₂ from Zn/ZnO TC	41,7 US\$/GJ
H ₂ from SMR (Nat Gas 2,8-3,3 US\$/GJ)	8,3-11,1 US\$/GJ
H ₂ from electrolysis (electricity from Solar troughs at 33,3 US\$/GJ)	55,6 US\$/GJ
H ₂ from electrolysis (electricity from Wind at 16,7 US\$/GJ)	47,2 dec to 27,8 US\$/GJ
Electricity from solar H ₂ and FC	91,7 US\$/GJ (0,33 US\$/kWh)

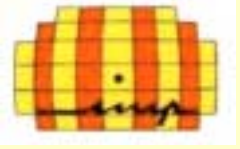
Les coûts de production

(Sce : Gaudernack, 1998; Steinfeld, 2002)



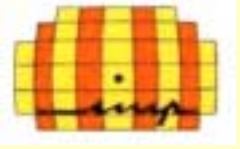
"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"

- ❑ Contexte environnemental et énergétique.
- ❑ Chaleur primaire solaire, température et rendement.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les fours solaires.
- ❑ Concentrateurs primaire + secondaire versus primaire: les centrales à tours
- ❑ La centrale à tour à concentration élevée: le four solaire du futur?
- ❑ Contexte économique.
- ❑ Conclusion: les recherches récentes, en cours ou à mener. !



Les recherches récentes, en cours ou à mener

- **1. Centrales à tour sans secondaire pour la production de chaleur primaire à haute température**
 - les codes de calcul existants et (ou) futurs?
- **2. Centrales à tour avec secondaires:**
 - Kribus et al., 1998
- **3. Optimisation couplage réacteurs et centrales: régime permanent et transitoires, exploitation de la ressource.**
- **4. Evaluation économique des systèmes: le coût du GJ de chaleur primaire solaire.**



Des solutions d'attente ? qui donneraient du temps pour la R&D.

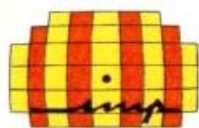
Electricity at 0,045 US\$/kWh	----->-----H ₂	24 US\$/GJ
	electrolysis	
Nat. Gas at 3 US\$/GJ	----->-----H ₂	
	CB&H	6,5 US\$/GJ
	SMR + sequest.	7 US\$/GJ

Gaudernack et al. 1998

Préparé par C.Royère, Septembre 2002

CB&H et SMR+sequ. (Sce :Gaudernack et al. 1998)

C.Royère



Bibliographie

Sources bibliographiques sur la concentration citées dans la partie « Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire ».

Four solaire à échelons (Henry La Blanchetais 1982)

Tours et secondaires (Kribus et al. 1998b; Segal and Epstein 1999; Spirkel et al. 1998; Spirkel et al. 1997)

Couplage récepteurs / champ (Kribus et al. 1998a; Segal and Epstein 1997; Steinfeld and Schubnell 1993)

Héliostat focalisant et four solaire (Chen et al. 2001; Chen et al. 2002)

Les références des sources citées dans le reste de la présentation sont consultables dans la partie : « Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire ? »

References.

Chen, Y. T., Chong, K. K., and Bligh, T. P. (2001). "Non-Imaging, focusing heliostat." *Solar Energy*, 71(3), 155-164.

Chen, Y. T., Chong, K. K., and Bligh, T. P. (2002). "Report of the first prototype of non-imaging focusing heliostat and its application in high temperature solar furnace." *Solar Energy*, 72(6), 531-544.

Henry La Blanchetais, C. (1982). "Perspectives sur la réalisation de fours solaires à vocation industrielle." *Entropie*, 18(107-108), 28-61.

Kribus, A., Kotera, Y., Zaibel, R., Carey, D., Karni, J., and Segal, A. (1998a). "A solar-driven combined cycle power plant." *Solar Energy*, 62(2), 121-129.

Kribus, A., Spirkel, W., Krupkin, V., and Yogeve, A. (1998b). "Performance limits of heliostat fields." *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 120(4), 240-246.

Segal, A., and Epstein, M. (1997). "Modeling of solar receiver for cracking of liquid petroleum gas." *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 119(1), 48-51.

Segal, A., and Epstein, M. (1999). "Comparative performances of "tower-top" and "tower-reflector" central solar receivers." *Solar Energy*, 65(4), 207-226.

Spirkel, W., Kribus, A., Timinger, A., Ries, H., and Muschaweck, J. (1998). "Non-axisymmetric reflectors concentrating radiation from an asymmetric heliostat field onto a circular absorber." *Solar Energy*, 63(1), 23-30.

Spirkel, W., Mann, M. K., Timinger, A., Ries, H., Muschaweck, J., and Kribus, A. "Asymmetrical con-type secondary concentrators for Fresnel type reflectors in solar towers." *SPIE*, 86-93.

Steinfeld, A., and Schubnell, M. (1993). "Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver." *Solar Energy*, 50(1), 19-25.

"Concentration du rayonnement solaire pour la production de chaleur primaire solaire"
Exposé de C.Royère

" GAT n°7: Solaire Thermique "

Lieu: IMP Perpignan, Zone d'activité Technosud
Date: 16 Octobre 2002