

Claude ROYERE

CNRS / IMP

Centre du Four Solaire Félix TROMBE

Odeillo



Claude.Royere@imp.cnrs.fr

"Production d'hydrogène par cycles
thermochimiques : passé, présent, énergie
primaire solaire ou nucléaire?"

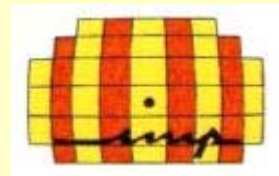
"HYSOL"

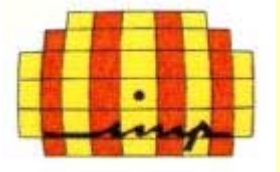
Lieu: IMP Perpignan, Zone d'activité Technosud
Date: 24 septembre 2002

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"



- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire.
- ❑ Les rendements.
- ❑ Les coûts de production de H_2
- ❑ Remarques en forme de conclusions.





Introduction : l'hydrogène et les cycles thermochimiques

- Les émissions de CO_2
- La consommation d'énergie
- L'intensité énergétique
- Une “ décarbonisation historique ” insuffisante
- L’ “ ère des gaz ”
- L'ampleur de la tâche : exemple l’ “ ère du nucléaire ”
- L’ “ économie de l'hydrogène ” vs “ oil economy ”
- Les cycles thermochimiques
- La source d'énergie primaire
 - Nucléaire
 - Solaire

Les émissions de CO₂ : Figure 1

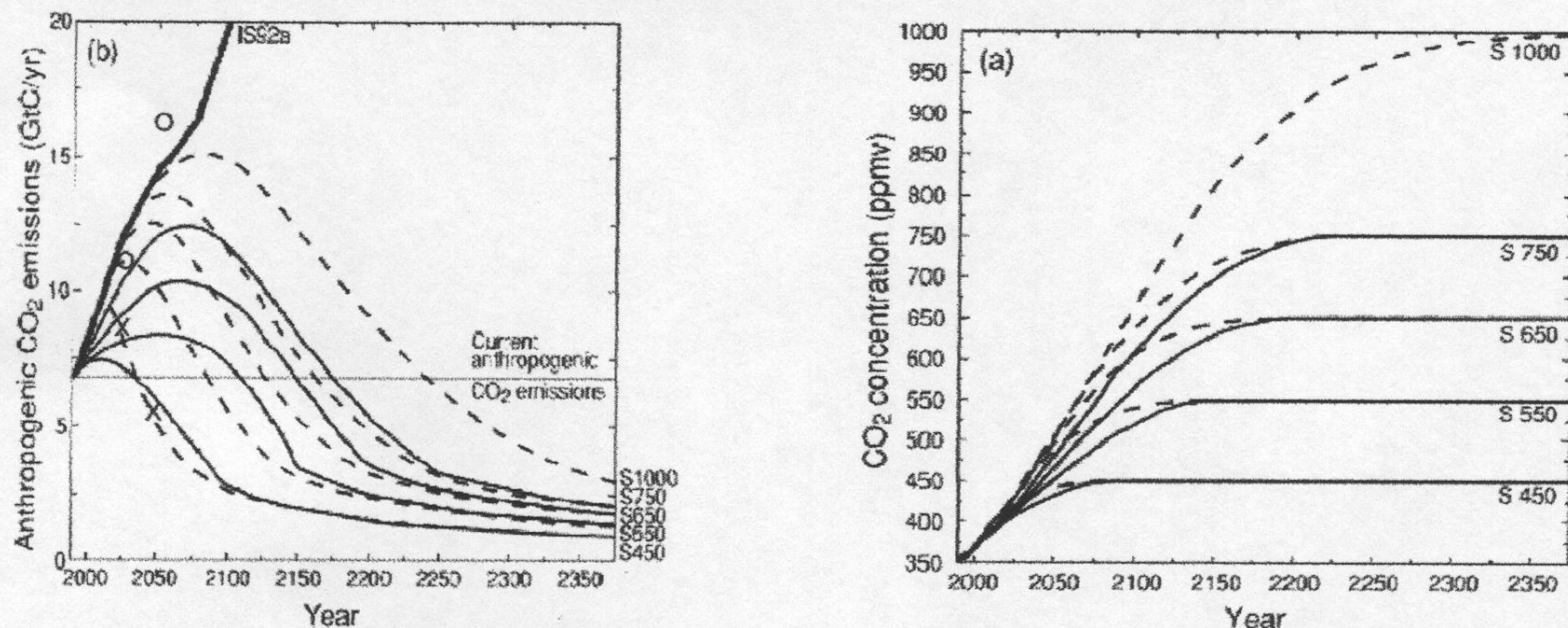
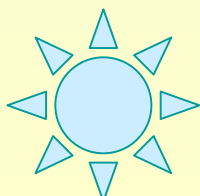


Figure 1 Examples of anthropogenic CO₂ emission patterns(left (b)). The curves are labeled by the asymptotic CO₂ concentrations. Full and dashed lines correspond to different patterns leading to the same concentrations. The same concentration is obtained if the area below the curves are the same. Crosses refer to emissions by our scenario, circles to the IIASA A2 scenario. The evolutions of the CO₂ concentration are shown on the right(a). From ref.2

Figure 1 : Les émissions de CO₂ ;Nifenecker et al. ISN(IN2P3) IEPE Grenoble, Mars 2002





Les émissions de CO₂ : Tableau 1

	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				



La consommation d'énergie: Tableau 2

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

L'intensité énergétique: figure 2

4

1 The Energy Heptagon

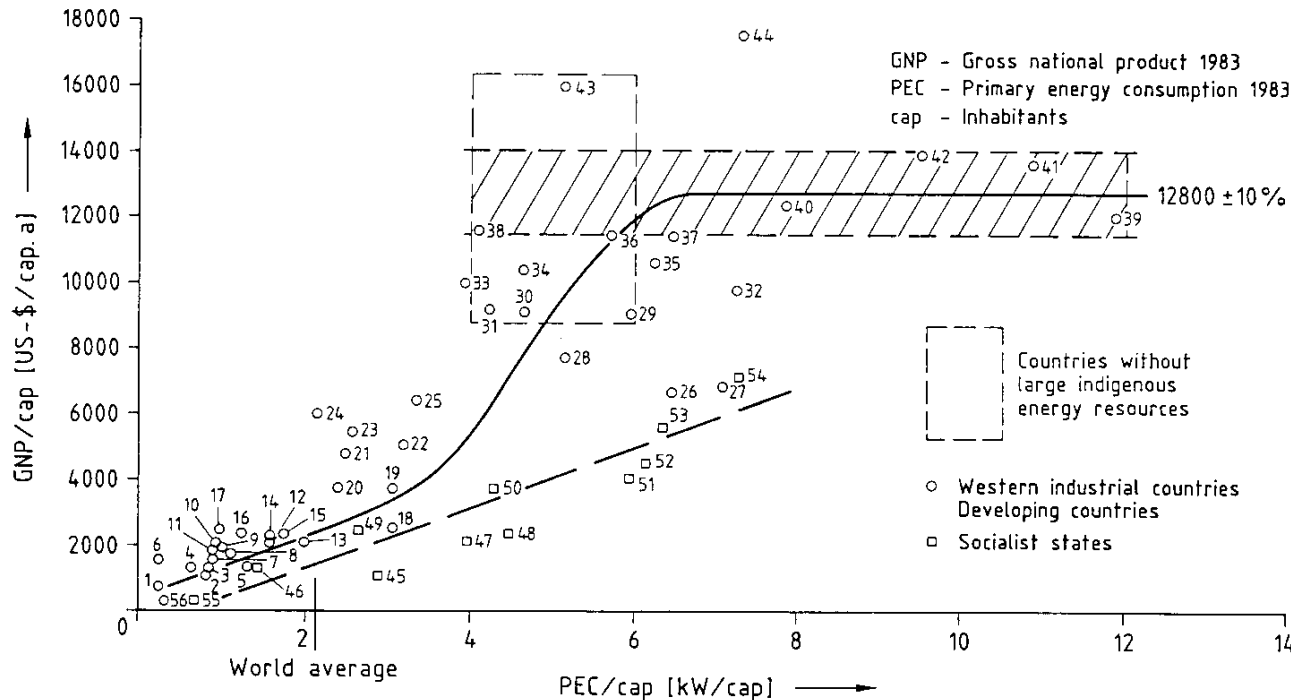
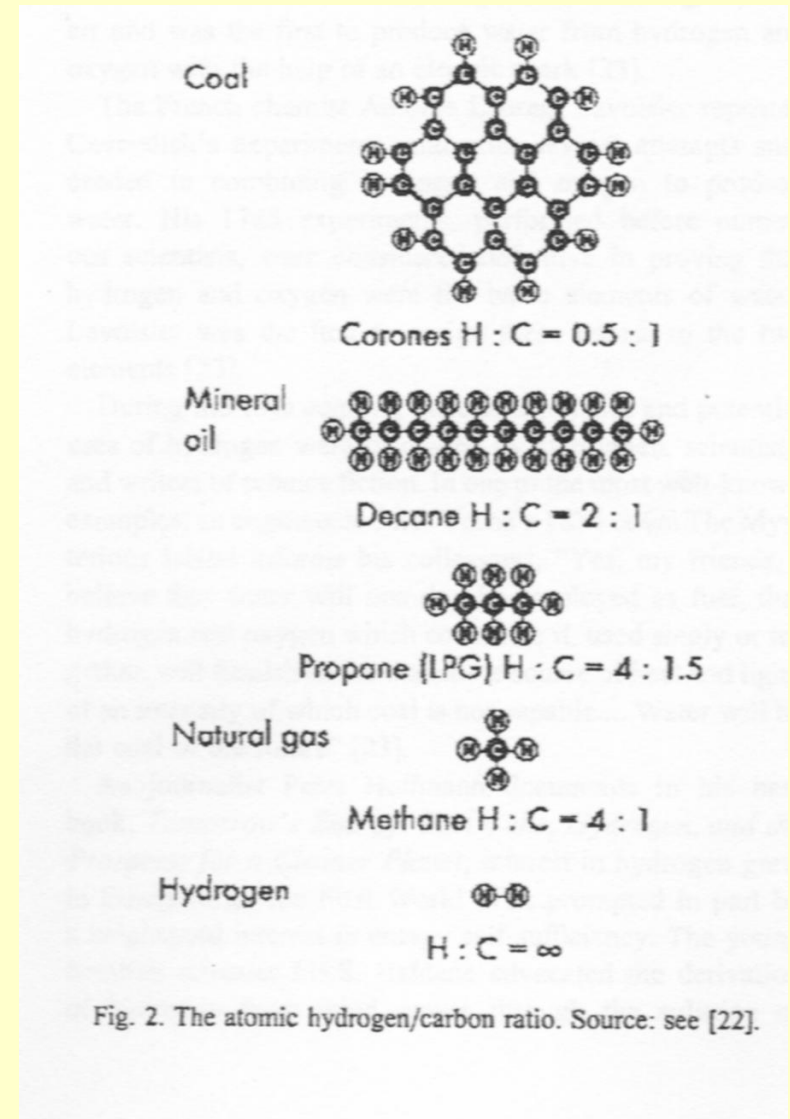


Fig. 1.2. Energy intensities of countries; 1:Ivory Coast; 2:Costa Rica; 3:Turkey; 4:Tunisia; 5:Jamaica; 6:Paraguay; 7:Ecuador; 8:Jordan; 9:Malaysia; 10:Chile; 11:Brazil; 12:South Korea; 13:Argentina; 14:Portugal; 15:Mexico; 16:Algeria; 17:Uruguay; 18:South Africa; 19:Venezuela; 20:Greece; 21:Spain; 22:Ireland; 23:Israel; 24:Hong Kong; 25:Italy; 26:Singapore; 27:Trinidad & Tobago; 28:New Zealand; 29:Belgium; 30:United Kingdom; 31:Austria; 32:Netherlands; 33:Japan; 34:France; 35:Finland; 36:West Germany; 37:Australia; 38:Denmark; 39:Canada; 40:Sweden; 41:Norway; 42:USA; 43:Switzerland; 44:Kuwait; 45:North Korea; 46:Cuba; 47:Hungary; 48:Romania; 49:Yugoslavia; 50:Poland; 51:Bulgaria; 52:USSR; 53:Czechoslovakia; 54:East Germany; 55:PR of China; 56:India [8,1].

See "Solar Power Plants" (1991) partie de C.J. Winter (origine : Bockris, J.O'M., Dandapani, B., 1987, Hydrogen Energy XII et reprise par Bockris, J.O'M. dans "Hydrogen Economy in the future" op. cit.)

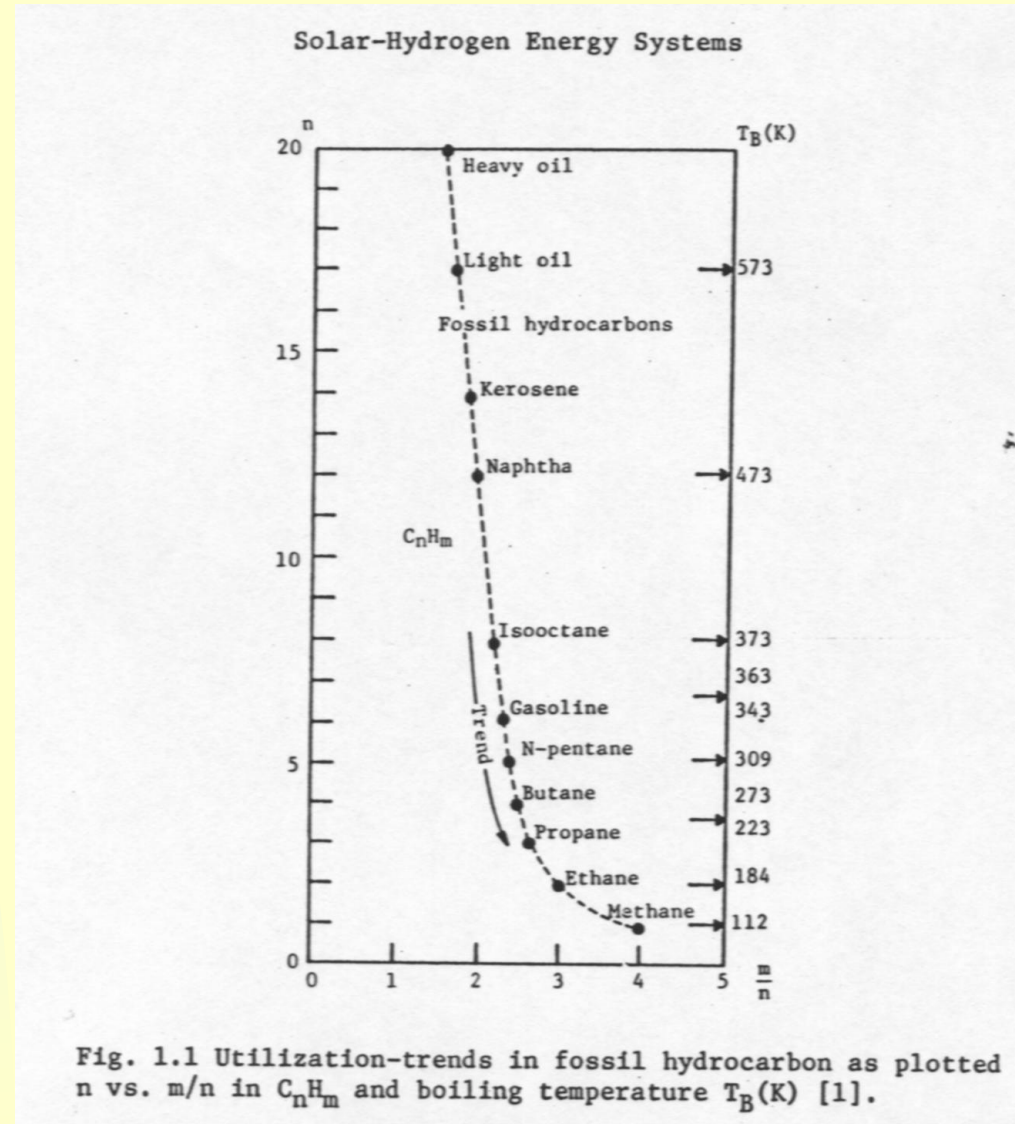
Une “décarbonisation historique” insuffisante: figure 3

- cette figure est citée par S. Dunn (origine : C.J. Winter) ; voir aussi Marchetti (NEA, 2000, p.36 et suiv. : “ On decarbonisation : historically and perspectively ”, à lire ! !)



Une “décarbonisation historique” insuffisante: figure 4

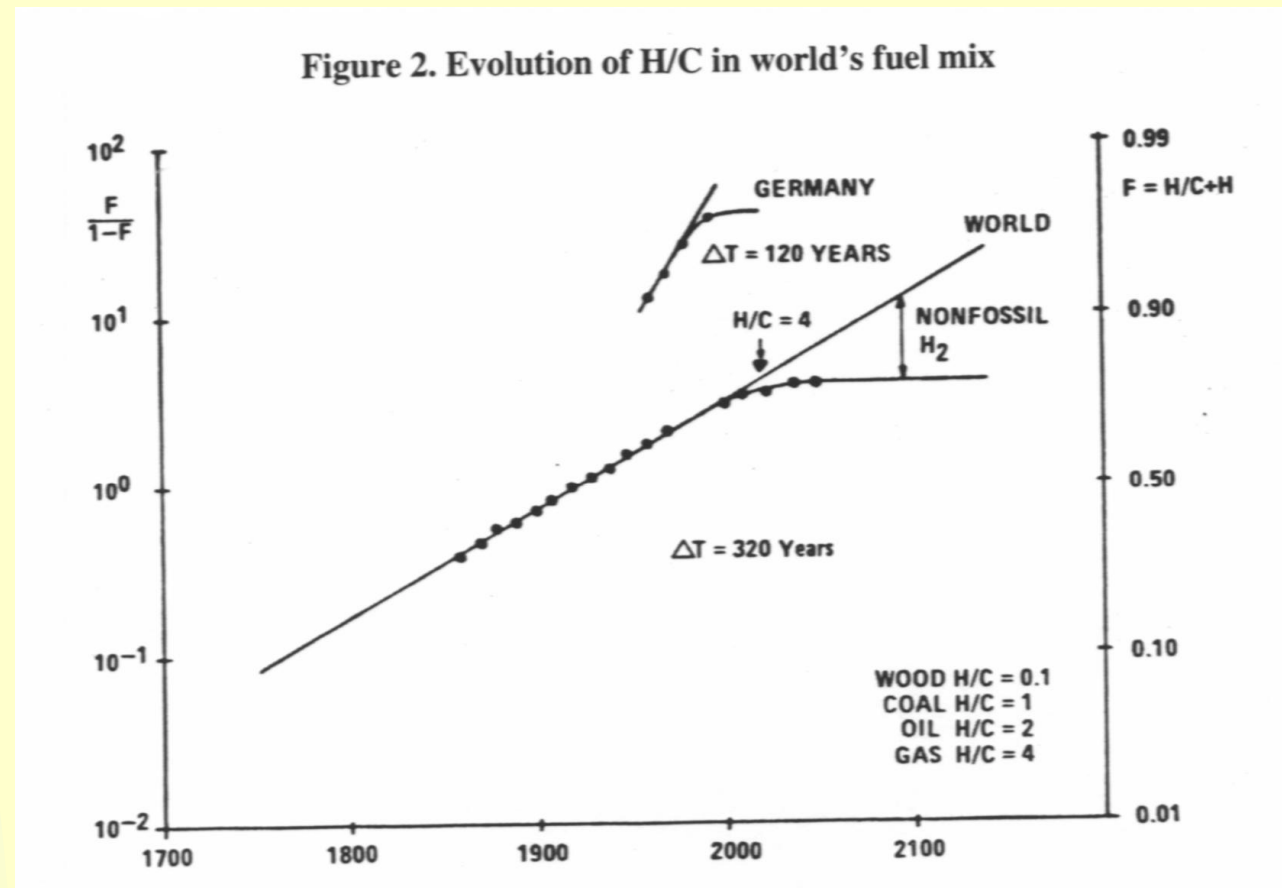
“ the trend ”
(Ohta, THEME,
1974) cité par
Sato (book,
1979)



C. Royère

Une “décarbonisation historique” insuffisante: figure 5

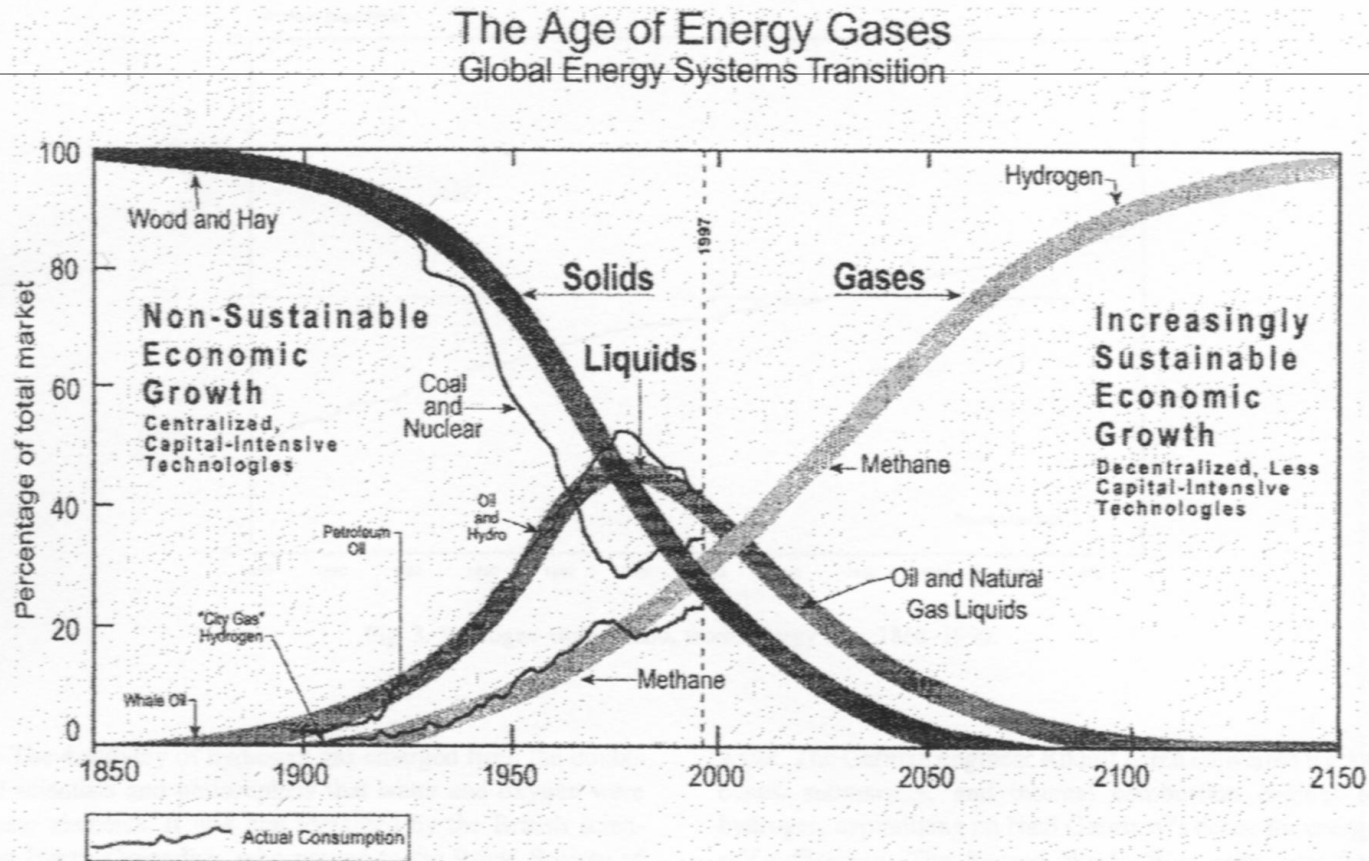
- Marchetti, NEA- OECD, 2000



Une “décarbonisation historique” insuffisante: figure 6

S. Dunn / International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 235–264

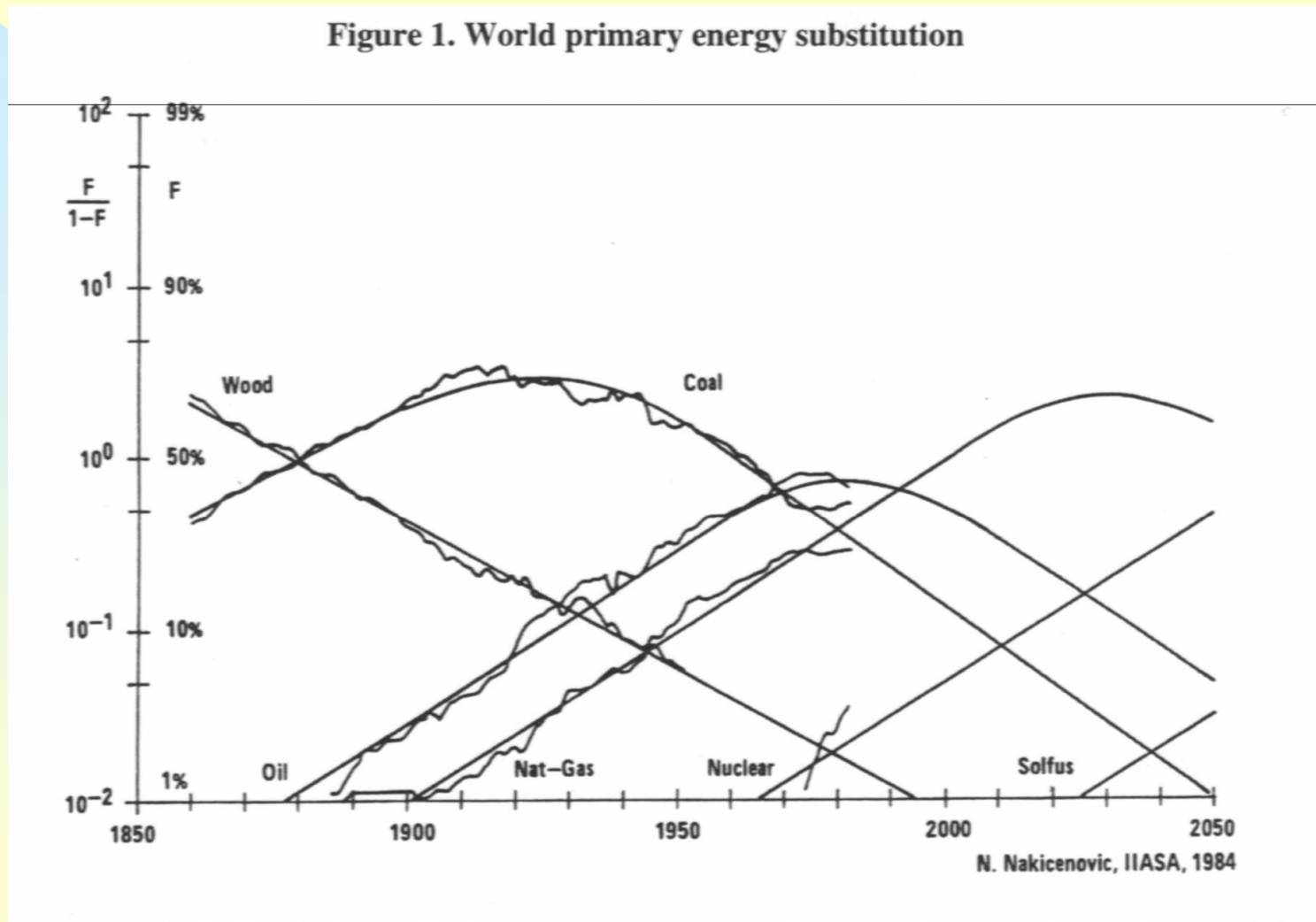
239



cette figure est citée par S. Dunn (références citées : Ausubel J.H. “Where is going energy ?” *Ind Phys* 2000, 16-19, lui-même cité par Hefner R.A. , GHK Company à deux réunions successives à Oklahoma City et à Madrid) ; à comparer avec fig de N.Nakicenovic, IASA, 1984 citée par Marchetti (NEA, 2000, p.36)

C. Royère

Une “décarbonisation historique” insuffisante: figure 7



L'ampleur de la tâche : exemple, l' " ère du nucléaire ": Tableau 3

	World total							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	IIASA(A2)	IIASA(A2)	Nuclear intensive	IIASA(A2)	Nuclear intensive	Hydrogen	IIASA(C2)	
1 Year	2000	2030	2030	2050	2050	2050	2050	2050
2 Population(Millions)	6168	8751	8751	10056	10056	10056	10056	10056
3 GDP(G\$)	27436	61597	61597	101519	101519	101519	101519	75050
4 GDP/Capita k\$	4,4	7	7	10,1	10,1	10,1	10,1	7
5 Primary Energy(Mtoe)	10710	18408	18408	24840	24840	24840	24840	14250
6 Primary Electricity(Mtoe)	4107	8060	8021	10231	10231	10231	20154	6524
7 Nuclear(Mtoe)	493	684	4902	1092	7034	16047	2163	
8 Fossil elec.	3008	5894	1638	6409	467	1378	952	
9 Nuclear+renewables	1099	2165	6383	3822	9764	18776	5573	
10 % Electricity	38.35	43.78	43.78	41.19	41.19	81.14	45.79	
11 Nuclear %El.	12	8,49	61,12	10,68	68,75	79,62	33,15	
12 Renewable% El.	14,75	18,38	18,38	26,68	26,68	13,54	52.26	
13 Fossil elec.%	73.25	73.13	20.42	62.64	4.57	6.84	14.58	
14 Nuclear(Gwe)	275	376	3387	607	4466	8915	1202	
15 Nuclear(% total)	4,6	3,72	26,63	4,4	28,32	64,6	15,18	
16 CO2(Mt C)	6976	11693	8465	16838	12695	5106	5114	
17 Saved CO2 %			27,61		24,61	69,68	69,63	
18 CO2(Mt C) OECD	3146	3973	1648	4266	2040	746		
19 Unat tons/year	31690	43983	315142	62414	401957	916951	115360	
20 Cumulative tons U nat		1,39E+06	4,10E+06	2,45E+06	1,13E+07	1,64E+07	4,31E+06	

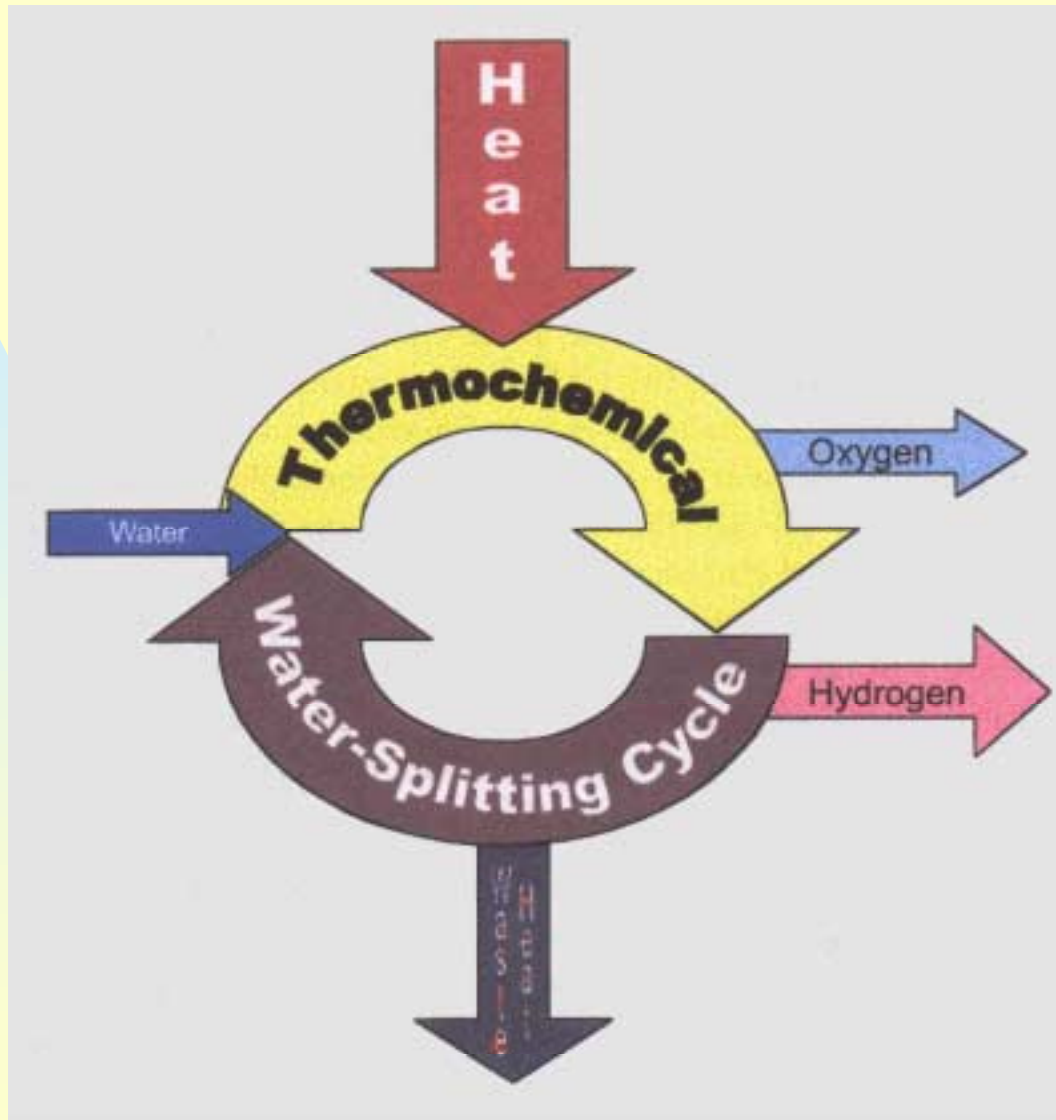
TABLE 1

L' " économie de l'hydrogène " vs " oil economy "

Articles généraux sur " l'économie de l'hydrogène " : l'hydrogène comme vecteur d'énergie :

- Bockris,J.O'M. " Hydrogen Economy in the future " Int. J. Hydrogen Energy 24, 1-15, 1999
- Bockris,J.O'M. " The origin of ideas on a Hydrogen Economy and its solution to the decay of the environment " Int. J. Hydrogen Energy 27, 731-740, 2002
- Citer l'anecdote de Bockris en 1969 qui entend en Suède l'idée formulée en 1930 par Lawaczek sur l'hydrogène (faible viscosité) pour le transport de l'énergie à la place de l'électricité
- Veziroglu,T.Nejat " Quarter century of hydrogen movement 1974-2000 " Int. J. Hydrogen Energy 25, 1143-1150, 2000
- Momirlan,M. Veziroglu,T.Nejat "Current status of hydrogen energy " Renewable and Sustainable Energy Reviews 6, 141-179, 2002
- Dincer,I. "Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems " Int. J. Hydrogen Energy 27, 265-285, 2002
- Dunn,S. " Hydrogen futures: toward a sustainable energy system " Int. J. Hydrogen Energy 27, 235-264, 2002
- Et leurs réponses respectives ;
- Citer Jules Verne, 1874, dans " L'ile mystérieuse " : annonce que l'eau avec l'hydrogène et l'oxygène dont elle est formée est le charbon du futur ; cité par Dunn, 2002 ; " hydrogen will furnish an inexhaustible source of heat and light " cité par Dincer, 2002 in " Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems " Int. J. Hydrogen Energy 27, 265-285, 2002

Les cycles thermochimiques: figure 8



Les cycles thermochimiques: figure 9

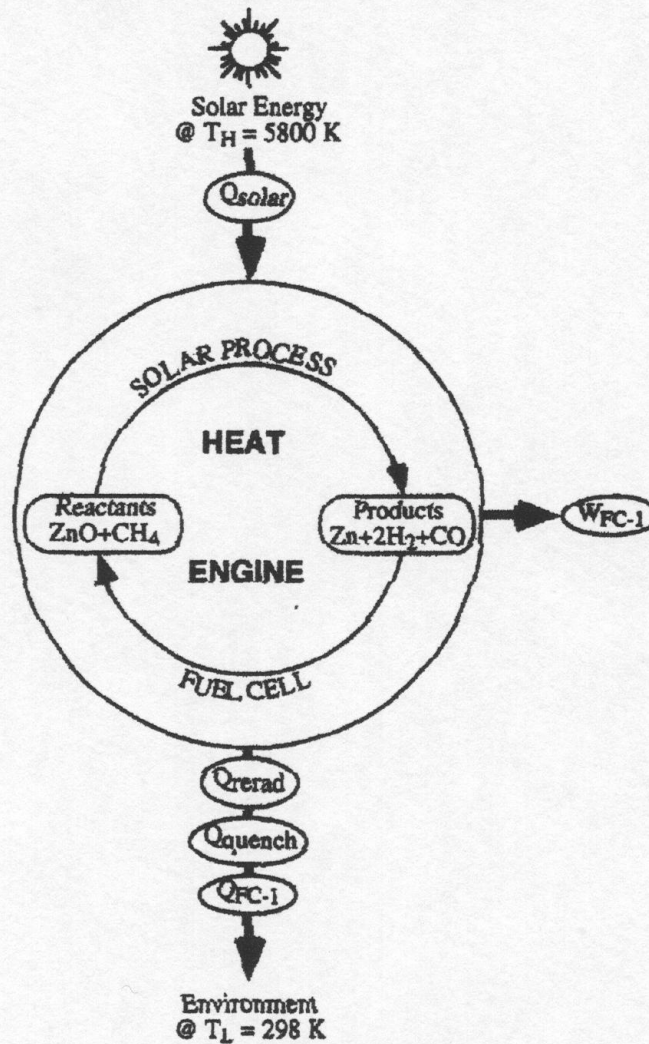


Fig. 2. The closed-cycle scheme represented as a heat engine.

Les cycles thermochimiques: figure 10

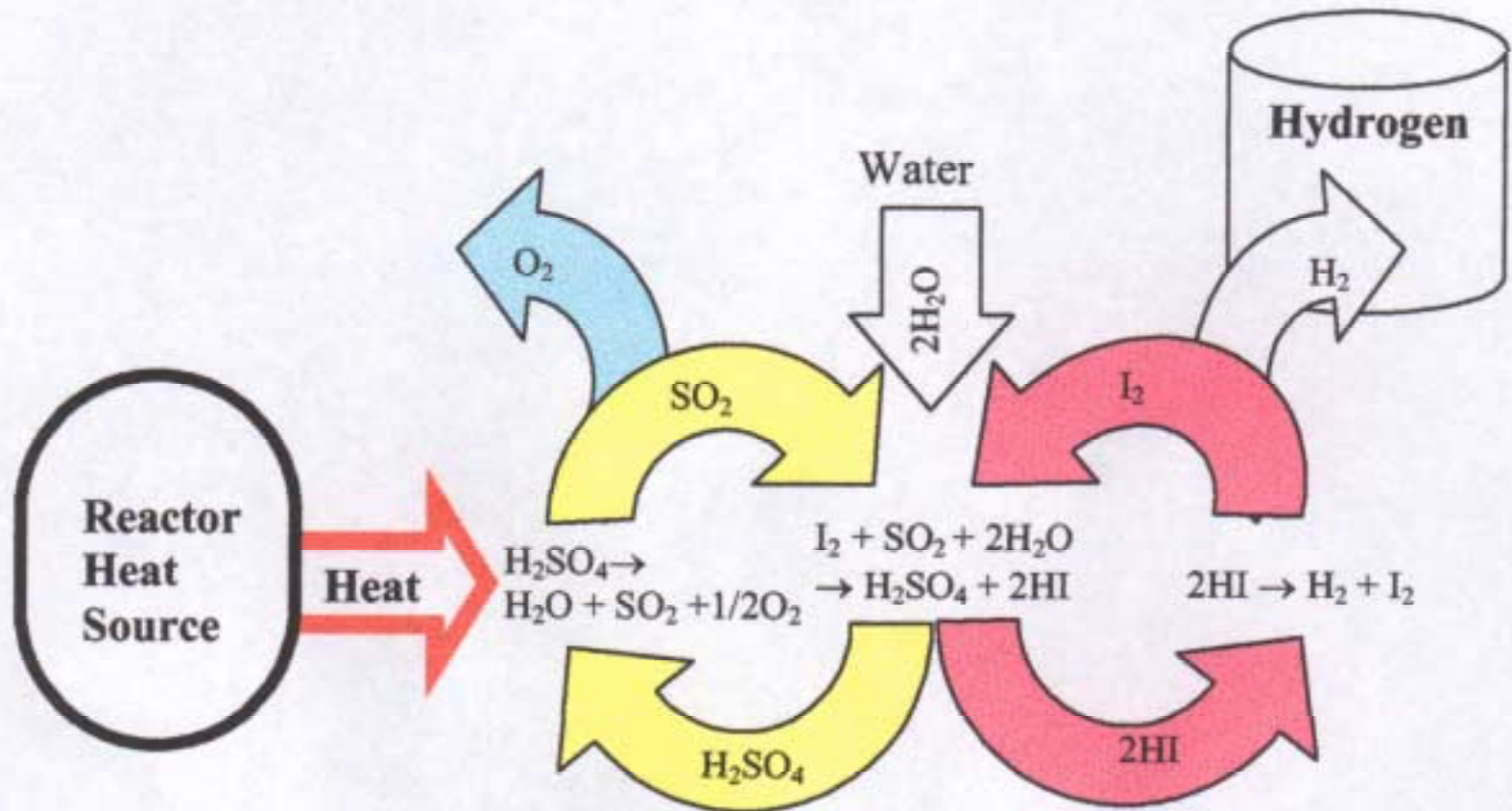


Figure 1 Sulfur-iodine thermochemical cycle for hydrogen production

La source d'énergie primaire Nucléaire: figure 11

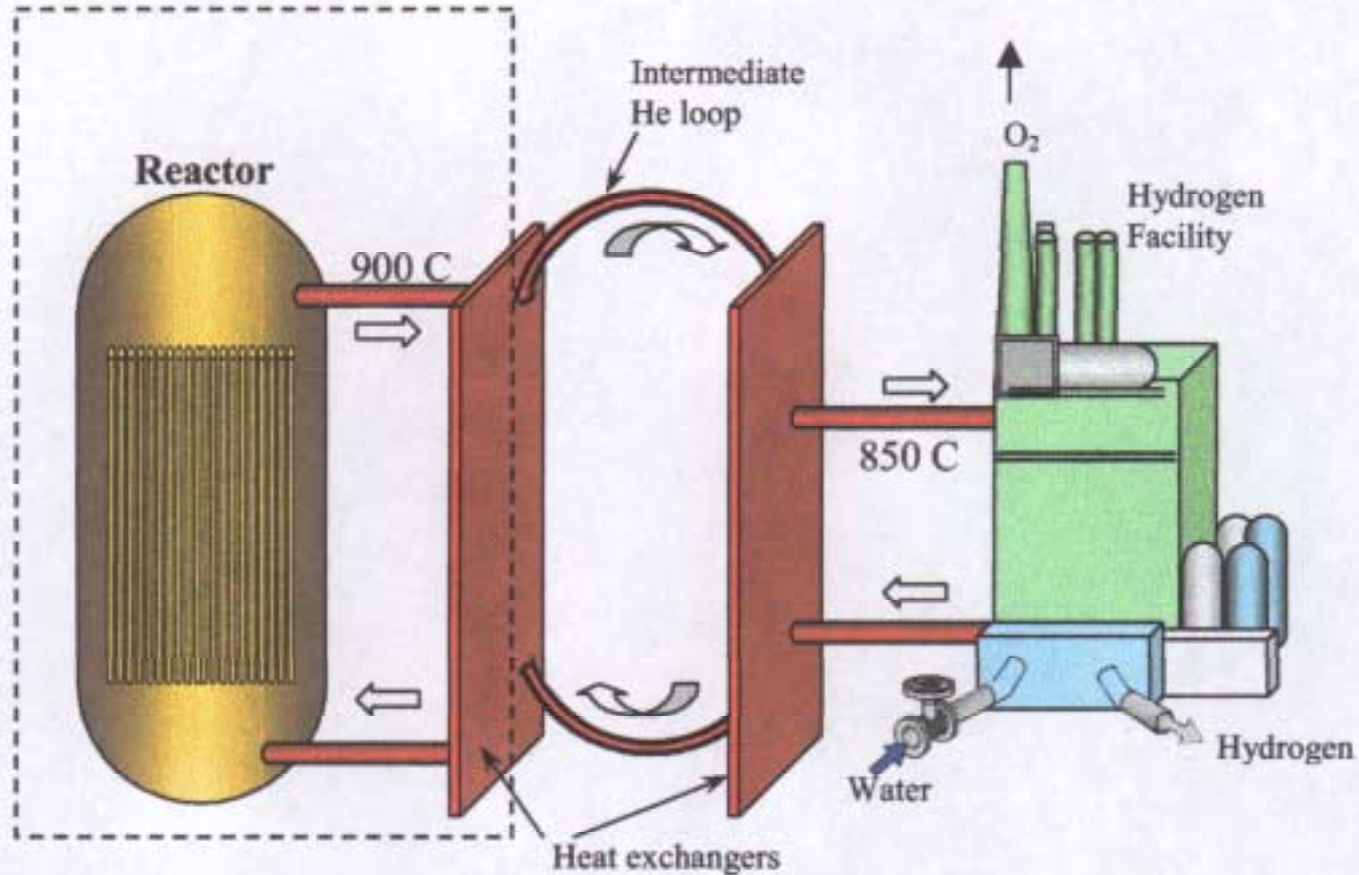
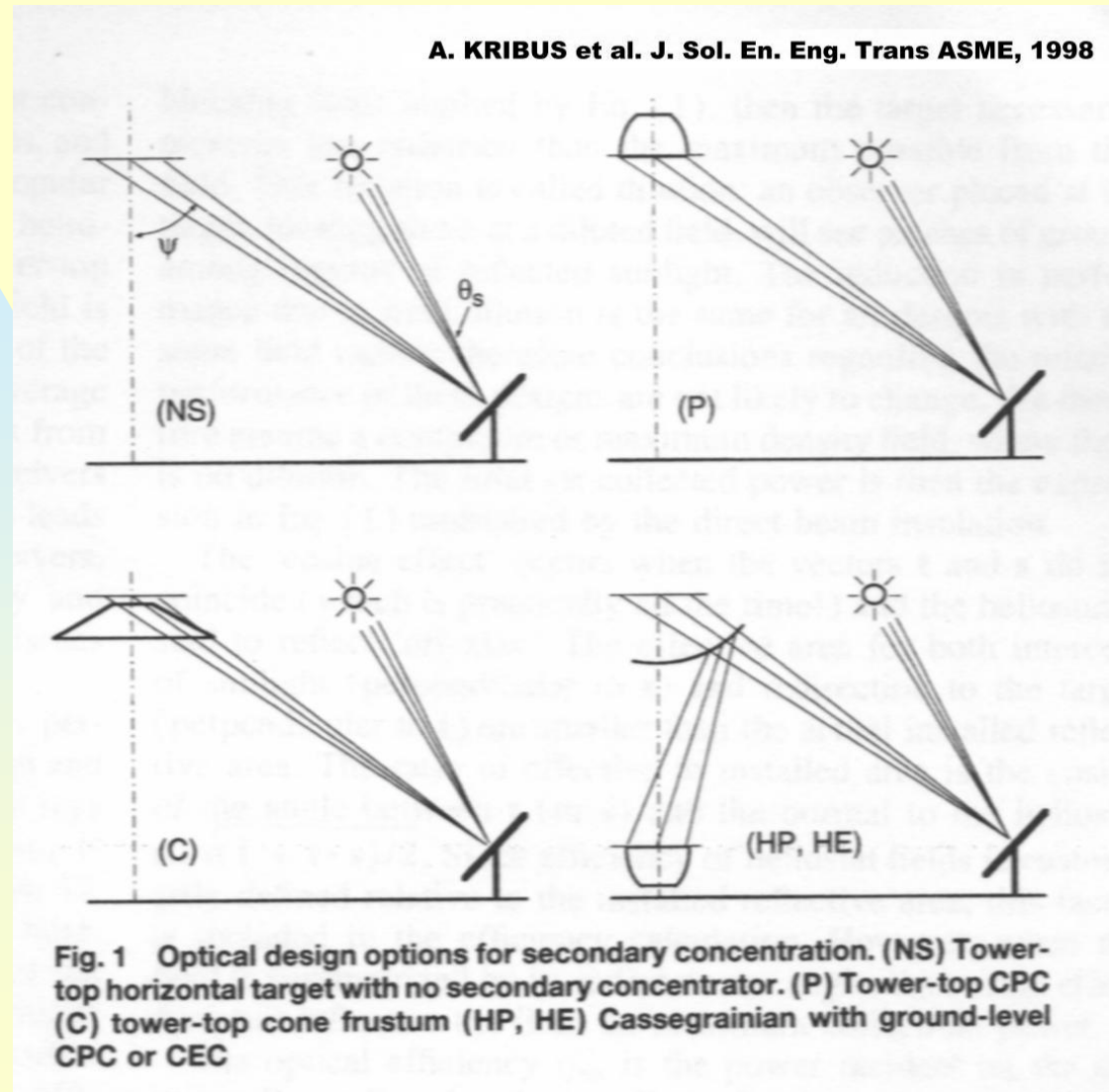


Figure 2 Schematic of nuclear reactor heat source with a water/thermochemical hydrogen production system.

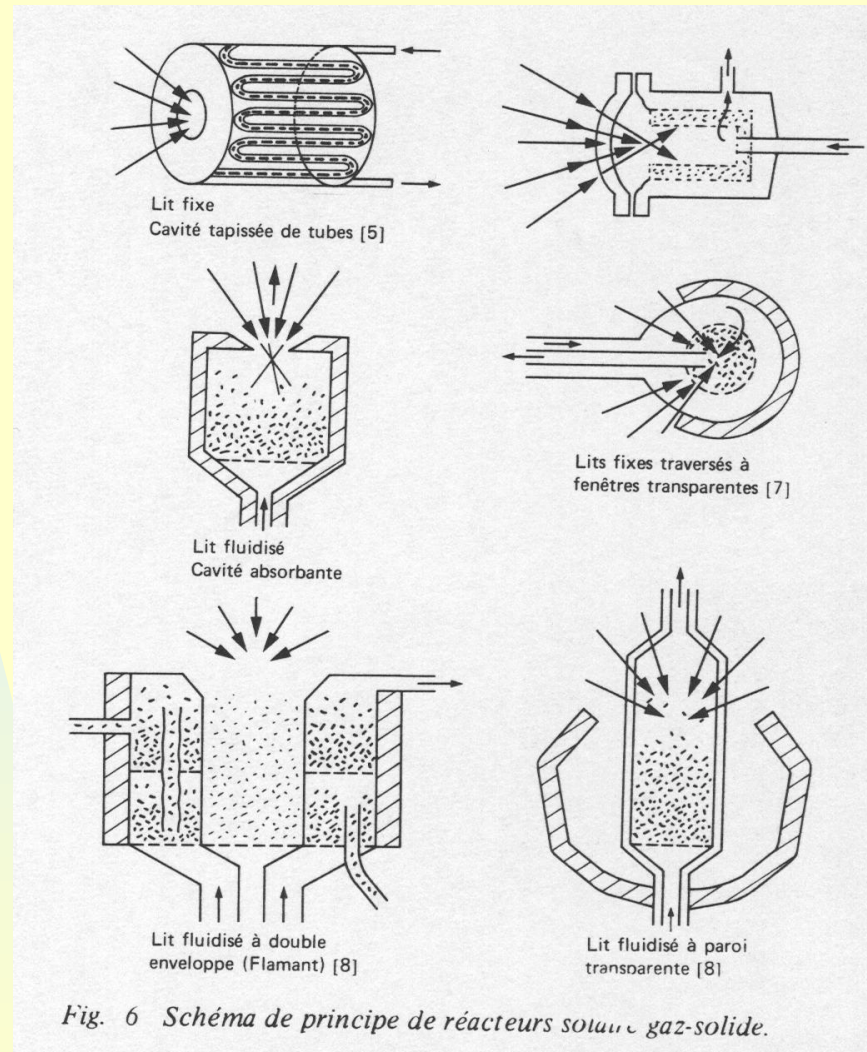
La source d'énergie primaire solaire: figure 12



La concentration solaire: Tower and CPCs
(Kribus et al., 1998)

C. Royère

La source d'énergie primaire solaire: figure 13



les réacteurs solaires (Villermaux, 1979)

C.Royère

La source d'énergie primaire solaire: figure 14

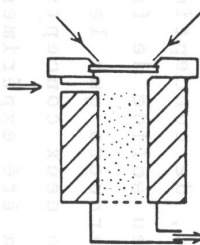
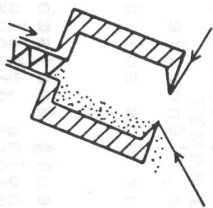
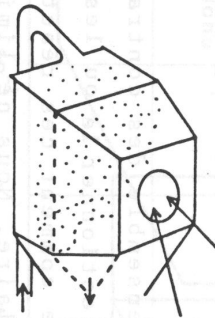
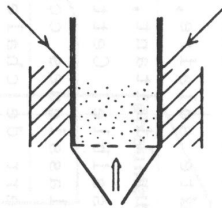
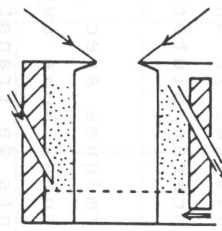
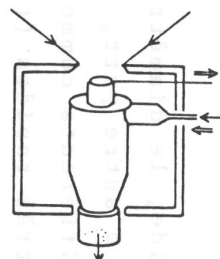
	LIT FIXE	FOUR ROTATIF	FILM TOMBANT	LIT FLUIDISE	CYCLONE	
						
TEMPERATURE	800-1000° C	700-1300° C	700-1000° C	500-1100° C	600-1000° C	800-1000° C
OBJECTIFS	Gazéification	stockage thermique, décarbonatation minérallurgie	pyrolyse stockage thermique	chauffage gaz décarbonatation	chauffage gaz stockage 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.

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information. ! !
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H₂
- ❑ Remarques en forme de conclusions

Les sources d'information.

- **INIST (CC, INSPEC, INIS, PASCAL-SCITECH), ContentsDirect Elsevier, Science Direct, Scirus**
- **Review papers of the late sixties - 1989 period**
 - ☞ Bilgen,E. Bilgen,C. Beghi,G.E. Ducarroir,M. (1979).
 - ☞ (Sato 1979;Beghi 1986; Yalcin 1989).
- **Une amorce très intéressante ...**
 - ☞ “ IAEA activities on the nuclear production of hydrogen ” (Kendall 2001)
- **...qui me conduit à l'équipe GA, Sandia, Kentucky Univ.**
 - **Le contact direct ; exemple : NEA-OECD, General Atomics (Kenya Suyama, Besenbruch,G.E. Brown,L.C. Funk,J.E. Showalter,S.K.)**

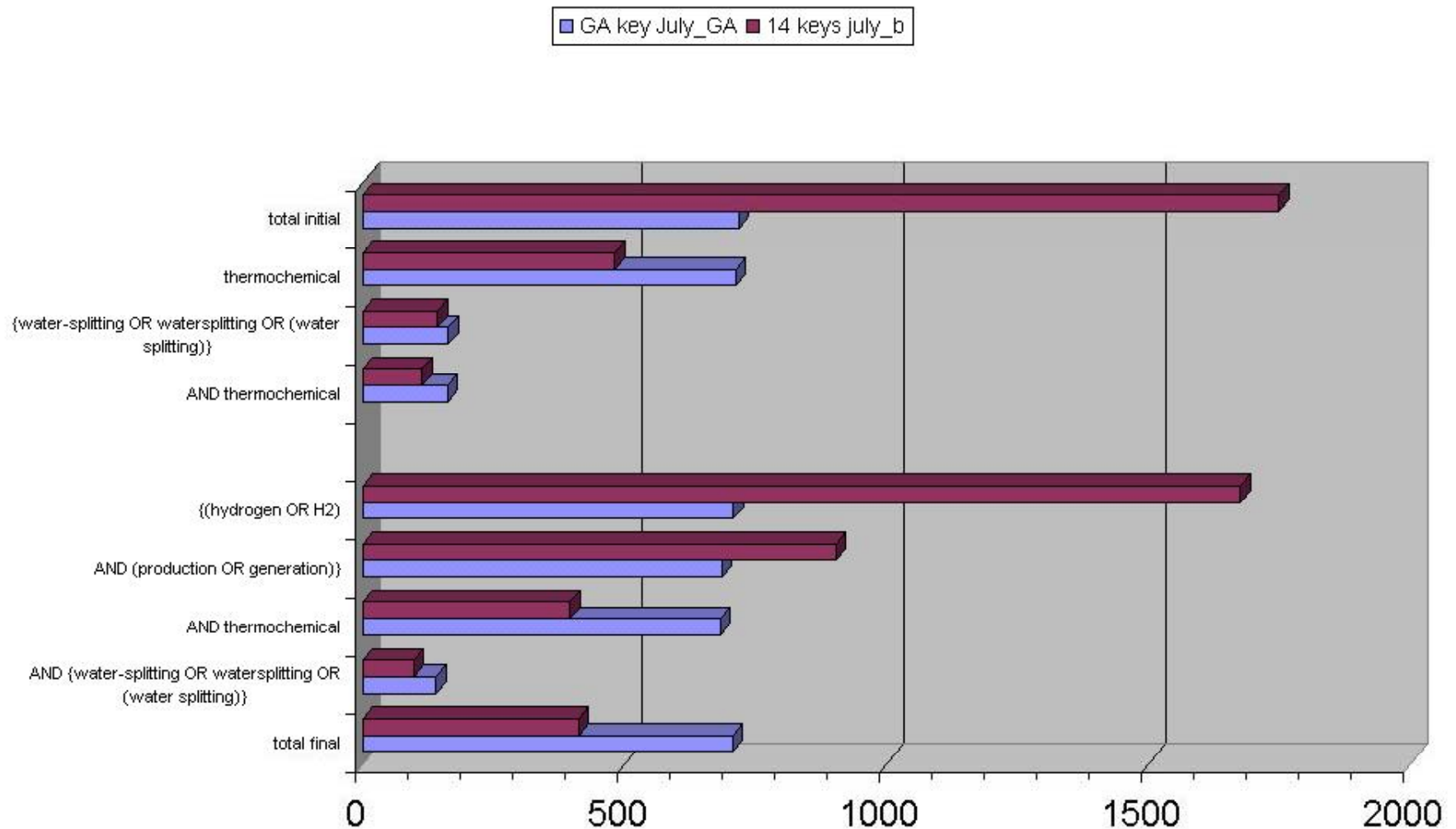
"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données. ! !
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H_2
- ❑ Remarques en forme de conclusions

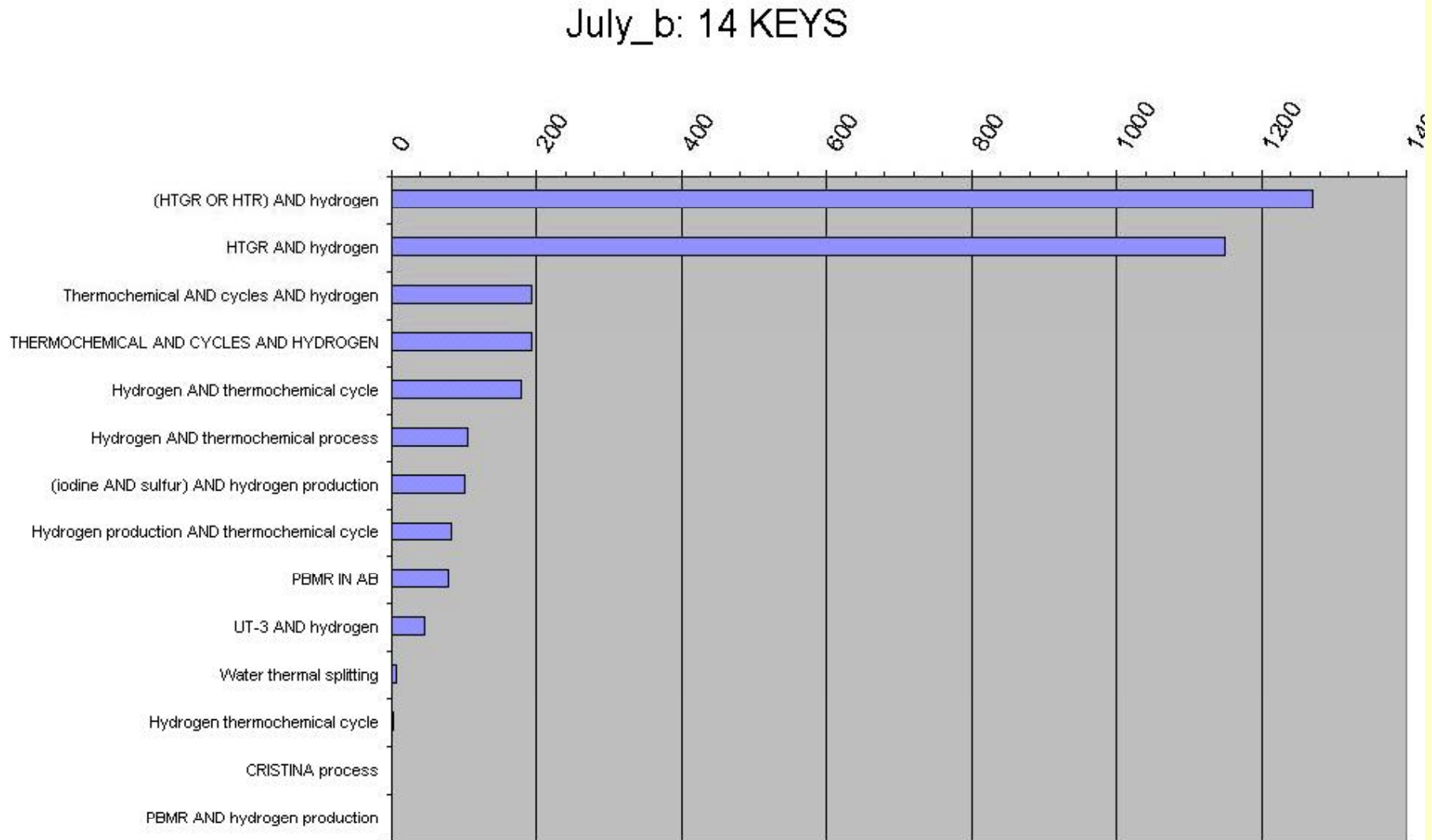
Les outils et les bases de données

- **Reference Manager, ProCite, EndNote V6 : Cite While You Write technology, txt and RIS files ;**
 - **2 bases de 1750 et 420 références**
- **Examen des résultats :**
 - les clés de recherche
 - comparaison des bases
 - comparaison avec base GA
 - les centres
 - les noms
 - les types de références
 - indices d'activité

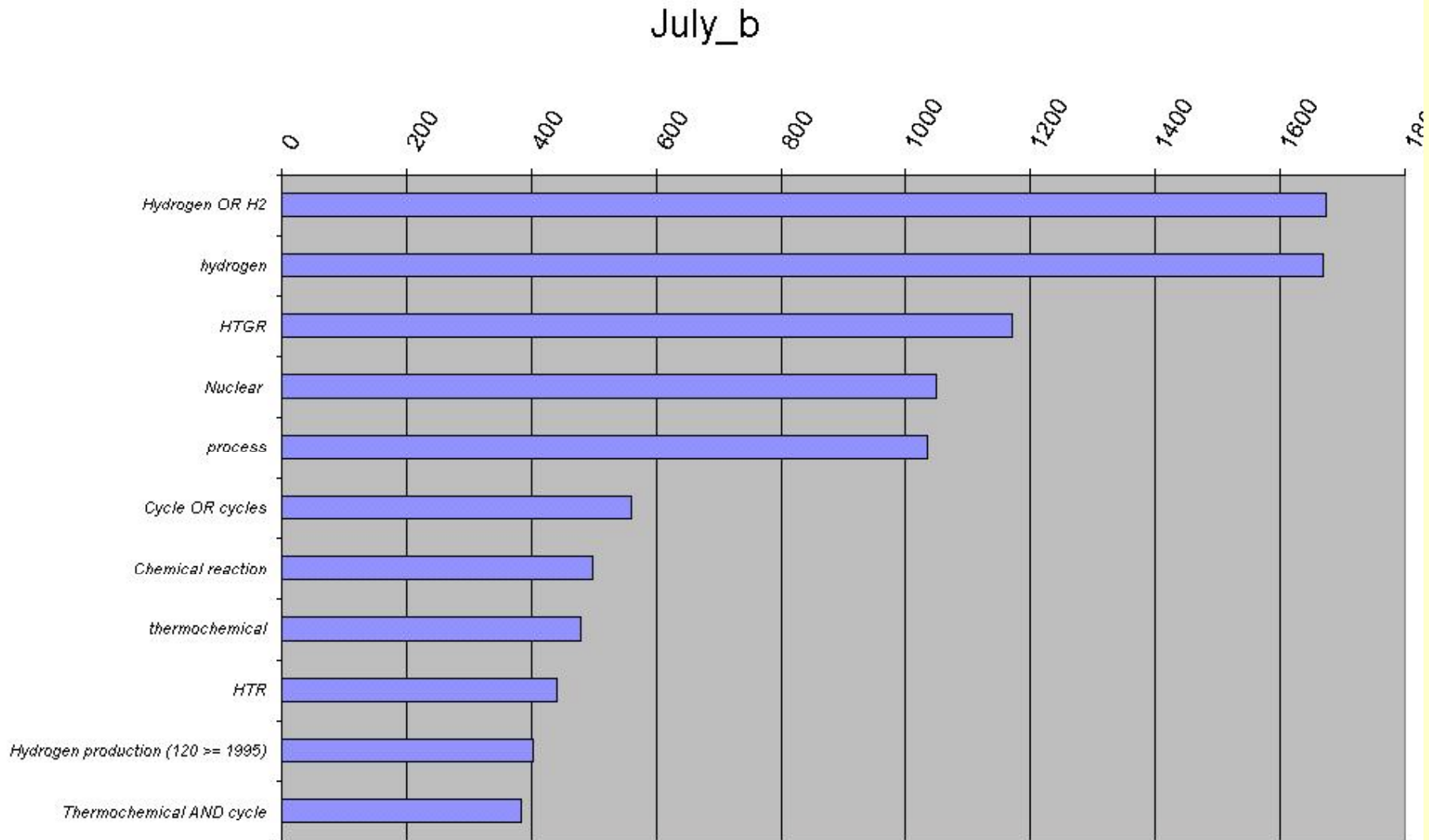
Les outils et les bases de données: figure 15



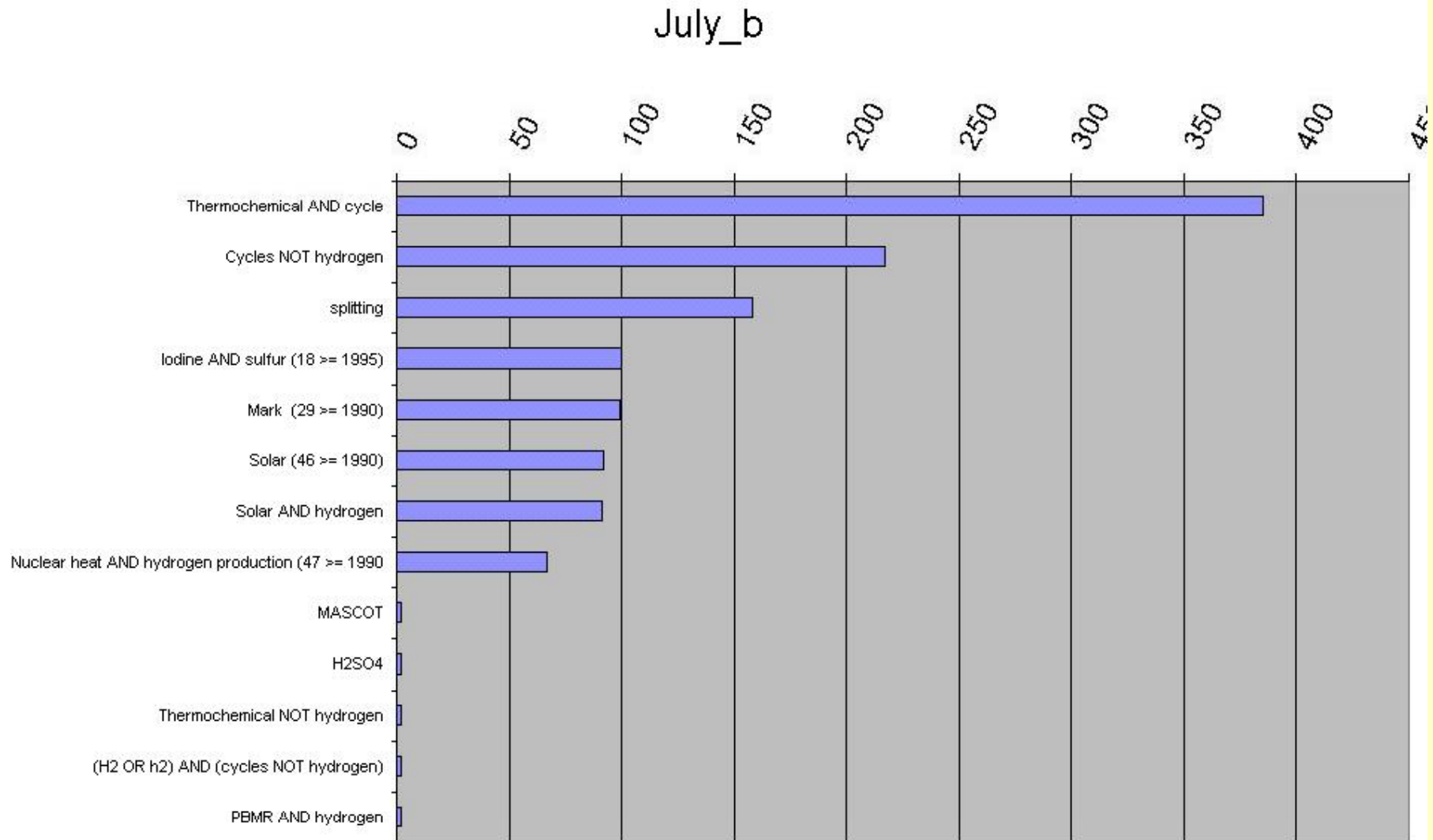
Les outils et les bases de données: figure 16



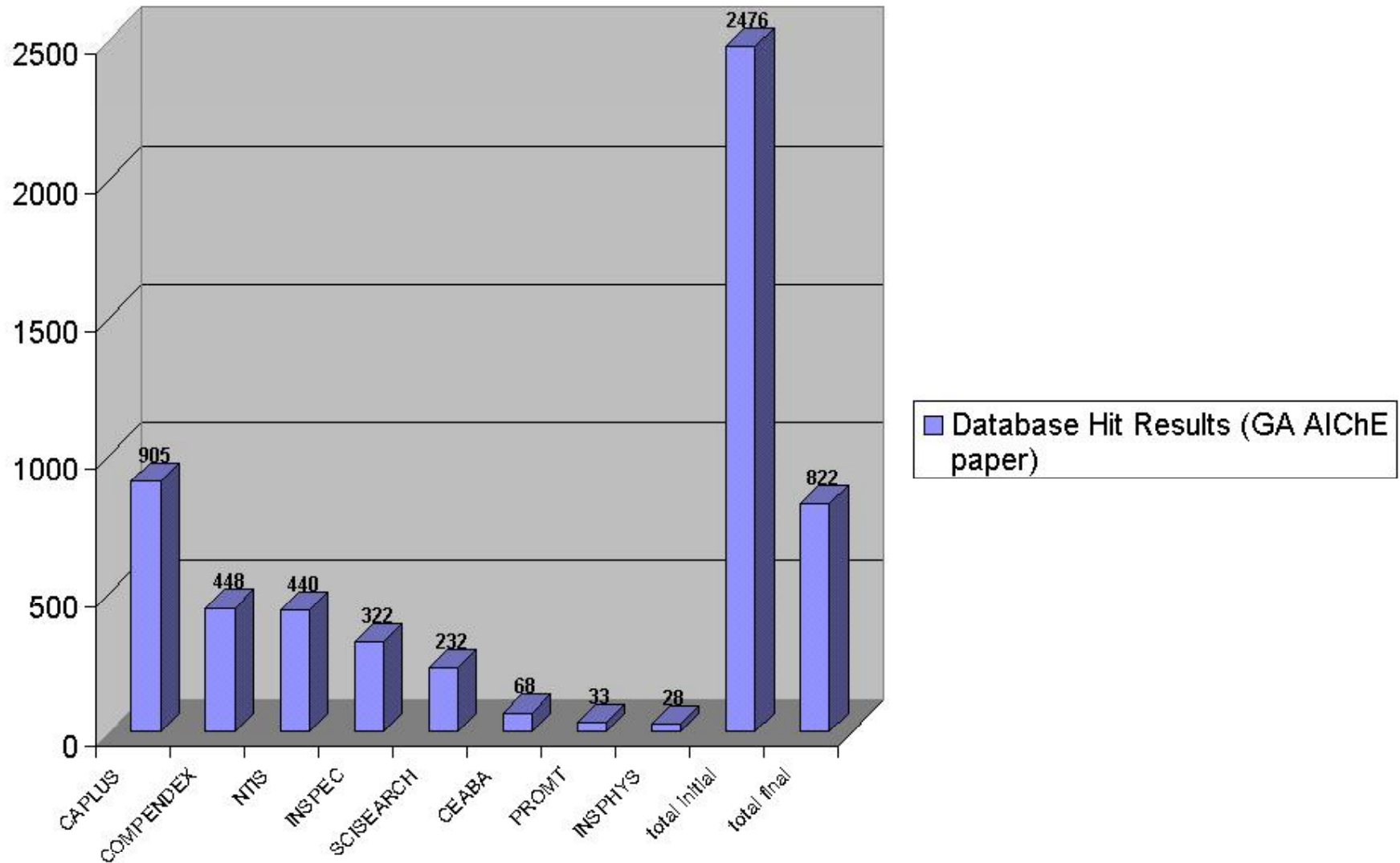
Les outils et les bases de données: figure 17



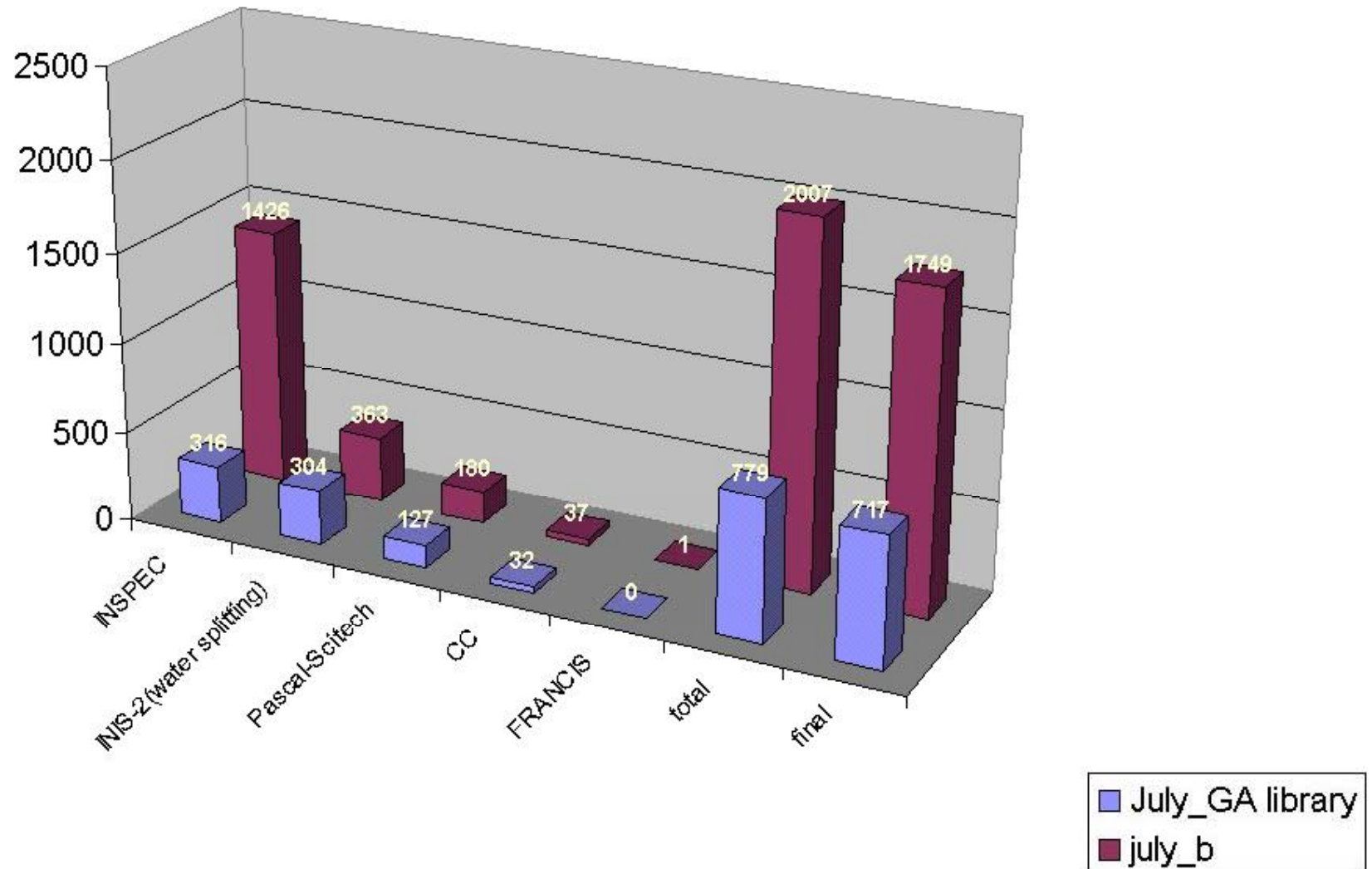
Les outils et les bases de données: figure 18



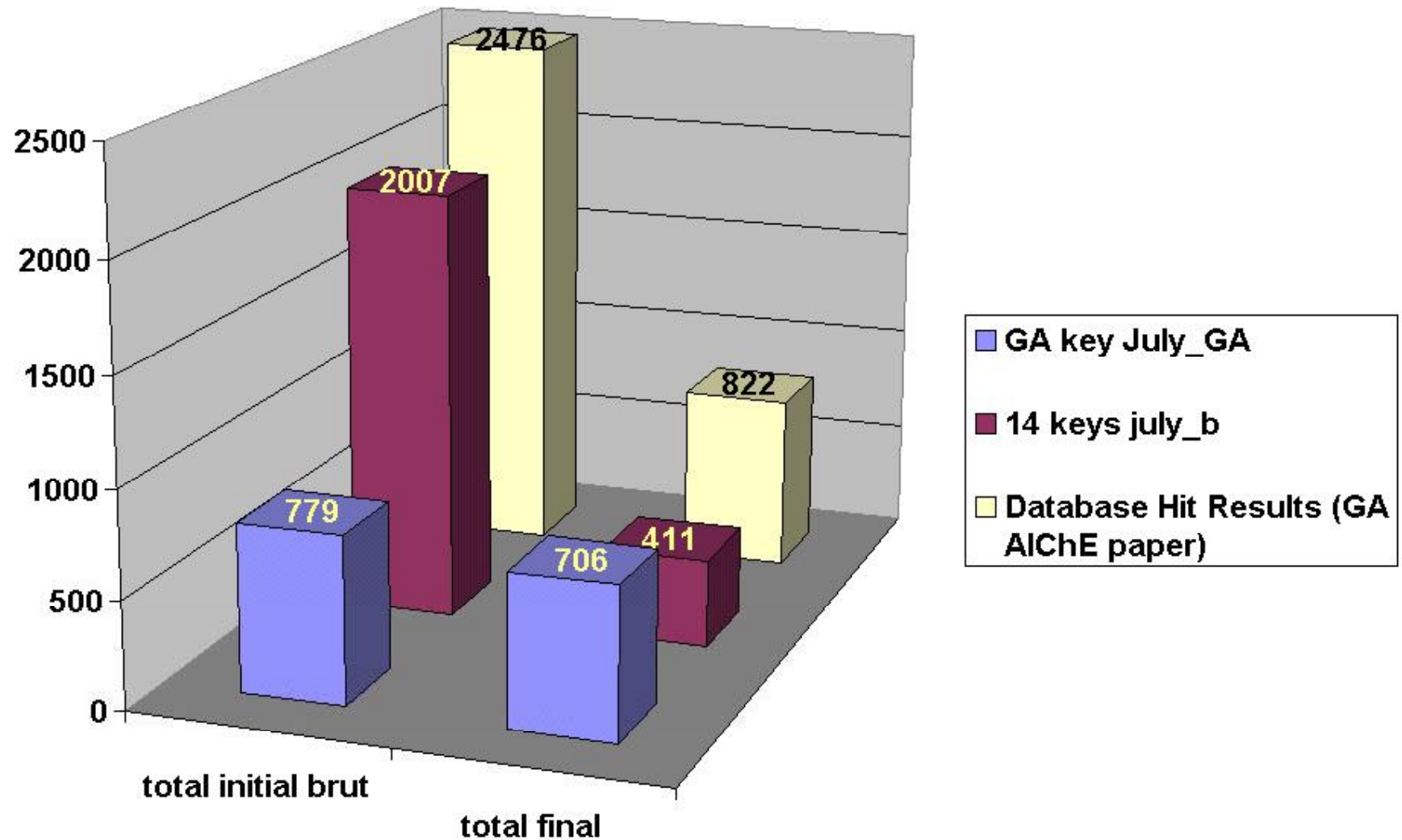
Les outils et les bases de données: figure 19



Les outils et les bases de données: figure 20

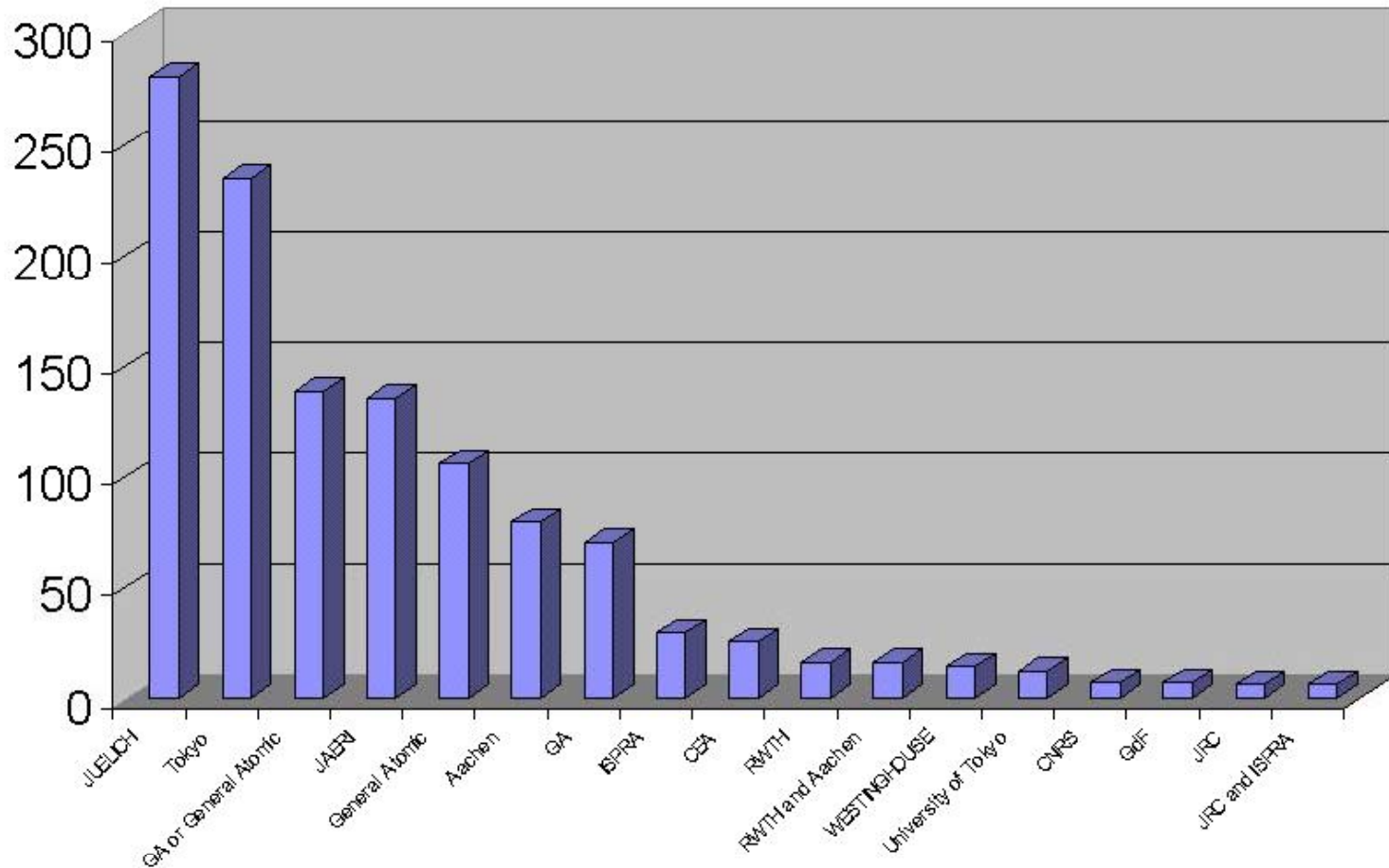


Les outils et les bases de données: figure 21



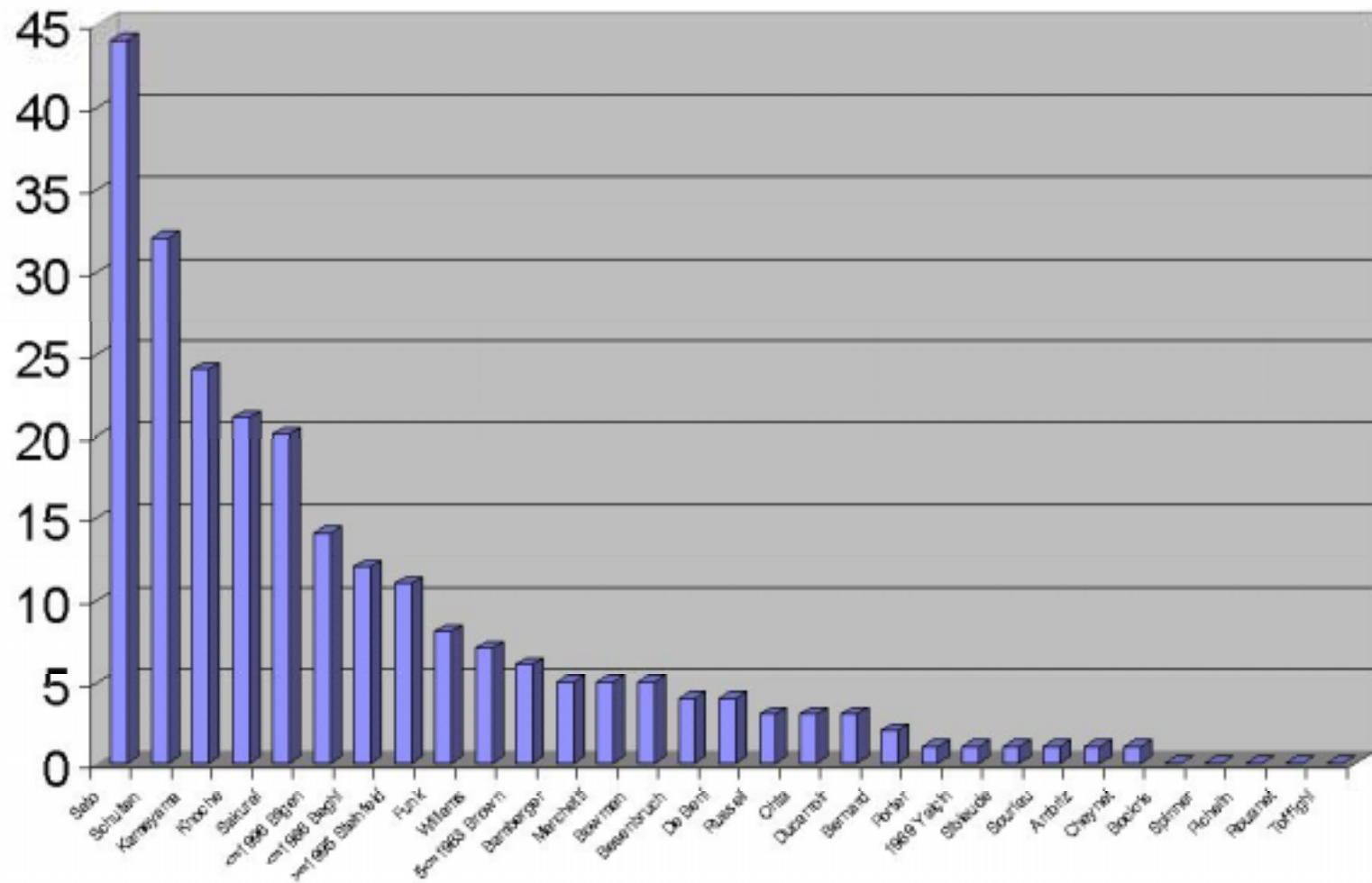
Les outils et les bases de données: figure 22

les centres de recherche - july_b

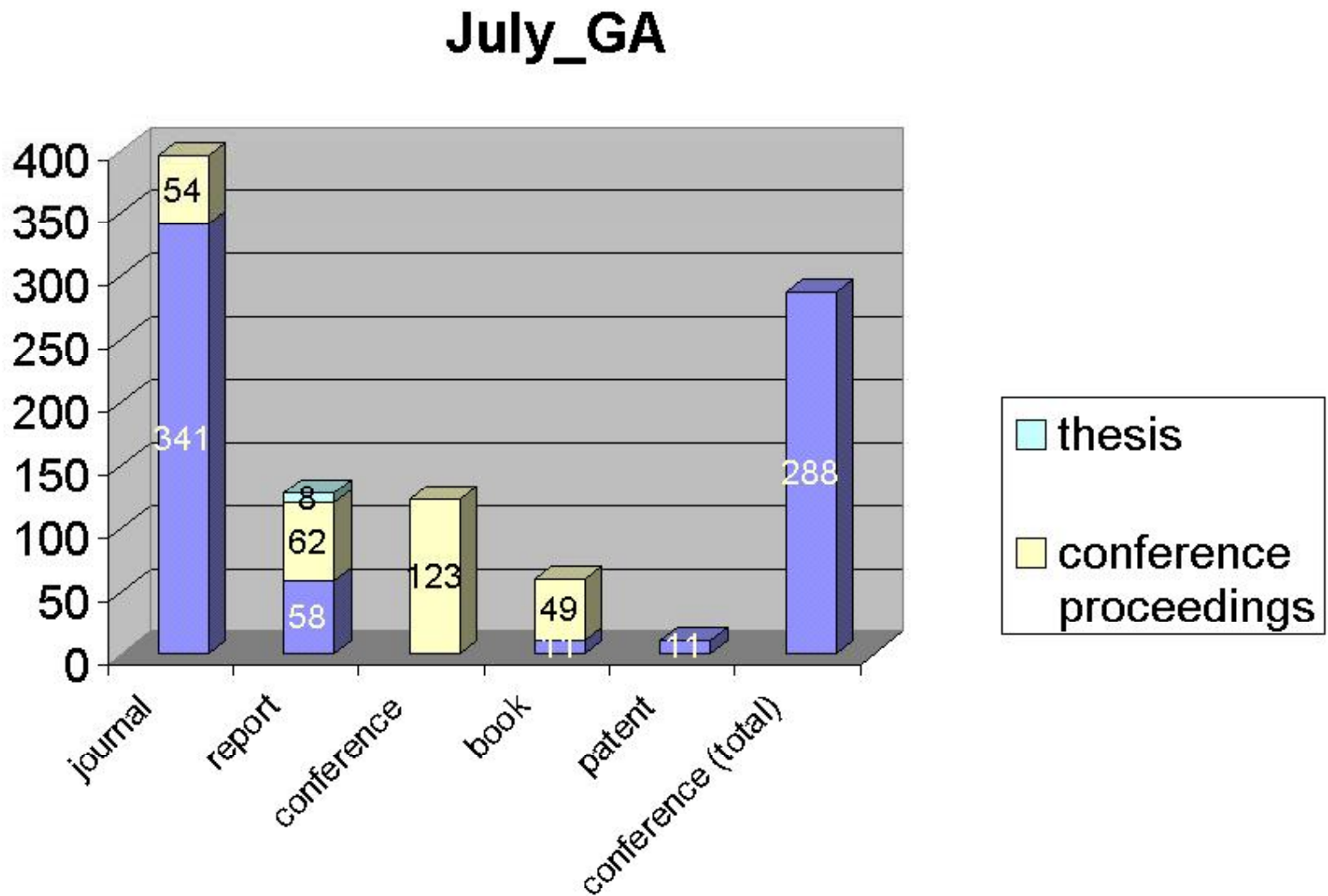


Les outils et les bases de données: figure 23

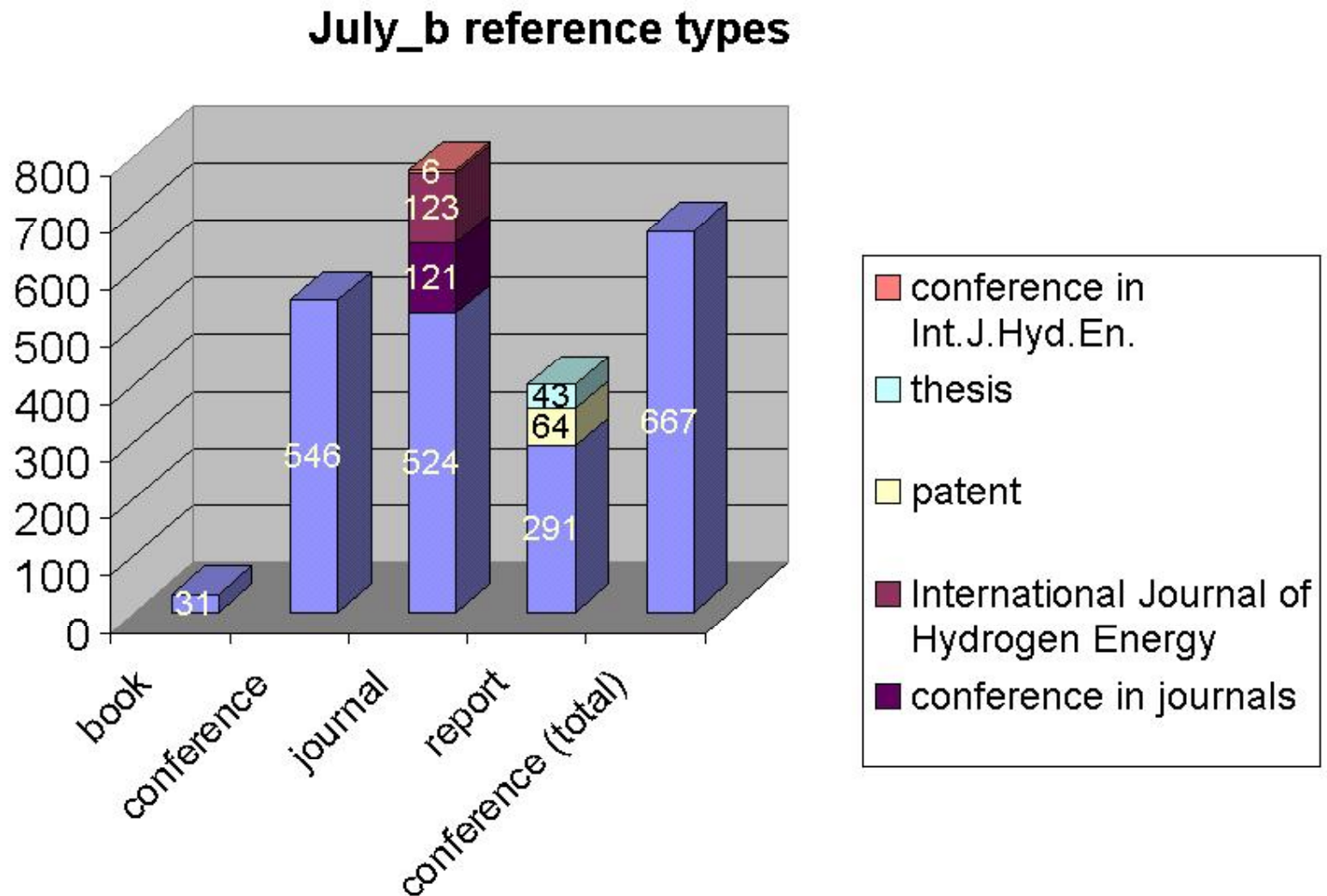
à la recherche des noms dans July_b



Les outils et les bases de données: figure 24

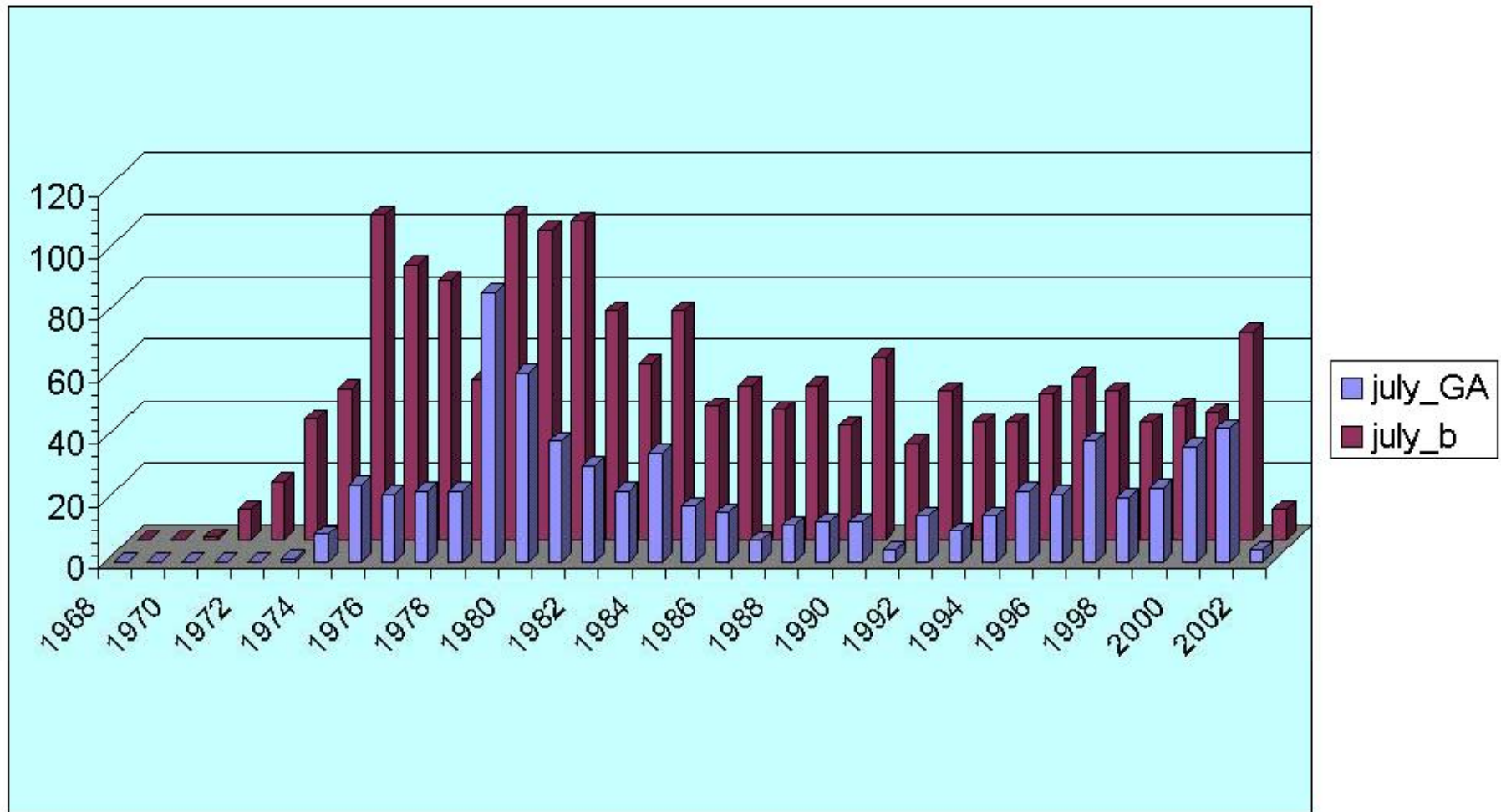


Les outils et les bases de données: figure 25



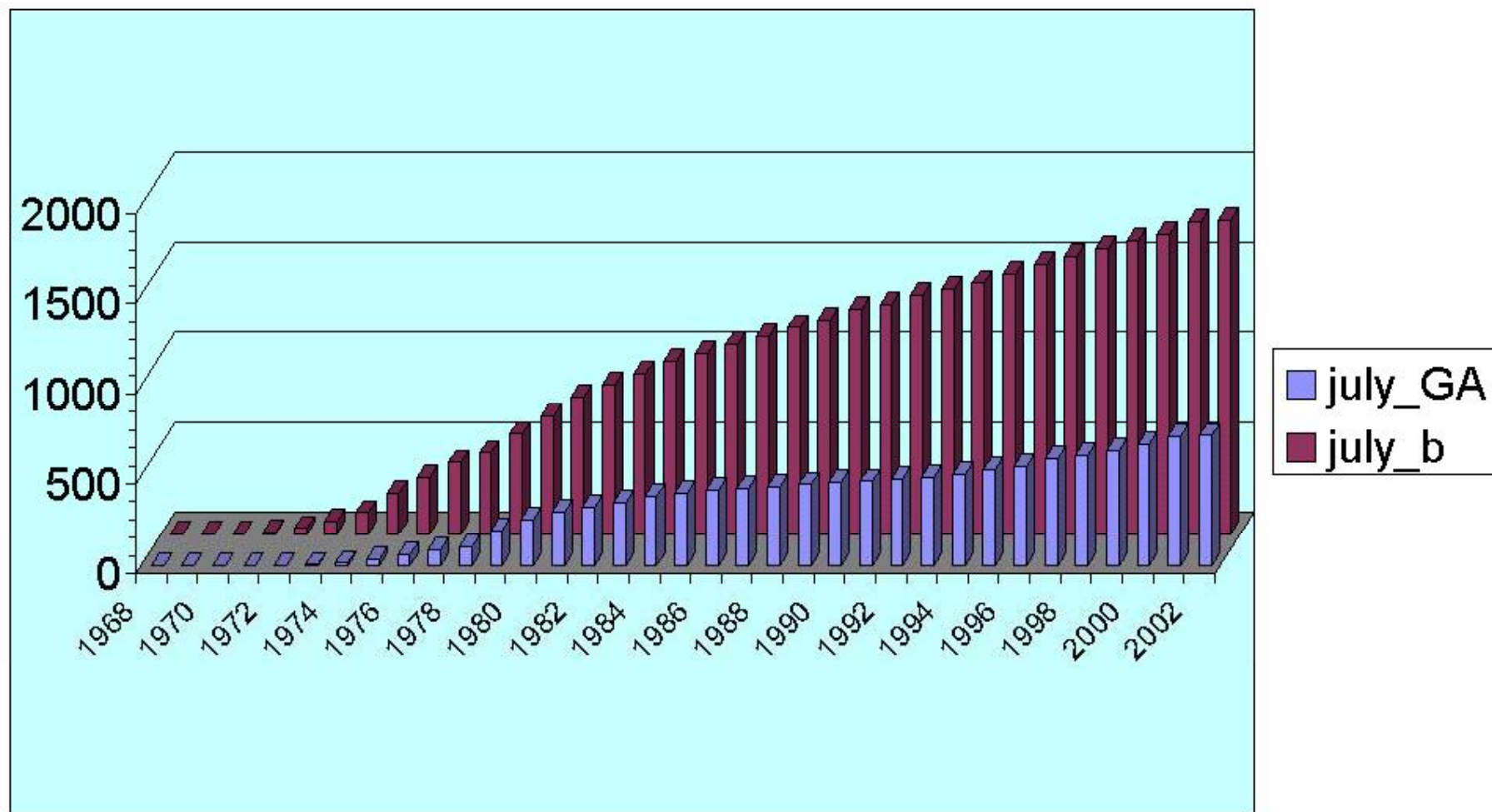
Les outils et les bases de données: figure 26

biblio juillet 2002 sur INIST



Les outils et les bases de données: figure 27

biblio juillet 2002 sur INIST



Les outils et les bases de données: tableau 4-a

➤ Access (μsoft) : tables, liaisons, requêtes, états, édition, recherche - 200 cycles en cours dans la base

	Primary ID	Name for cycle	List of	Class	#step	Max	# of elements
1	195	LASL (US) CO2 cycle	C	T	2	2300	1
2	107	H2O 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 MSO4 / 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) Fe3O4	Fe,Na	T	3	1470	2
11	18	Euratom 1970 De Beni JRC Ispra (Italy) KFA Fe3O4 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) NaMnO2 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/Mn3O4	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 BaSO4 Complex Oxide-Sulfate LASL, M.G.Bowman	Ba,Mo,S	T	3	1000	3

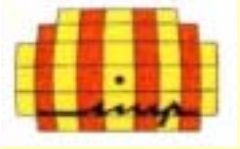
exemple : les cycles au-dessus de 850 °C C.Royère

Les outils et les bases de données: tableau 4-b

	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) H2SO4/CH4 cycle	C,S	T	4	1000	2
34	108	Sulfates CdSO4 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) Li2O.Mn2O3	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 FeSO4 _ 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 H2SO4/S cycle see General Atomic Cycle 23 S	S	T	4	950	1
52	46	LASL (US) CrBr3	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 ZnSO4 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

exemple : les cycles au-dessus de 850 °C

C.Royère



Les outils et les bases de données: tableau 4-c

	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 FeI ₂ -CO ₂ 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 FeSO ₄ _ 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

exemple : les cycles au-dessus de 850 °C

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période !!
1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H₂
- ❑ Remarques en forme de conclusions

Les critères et les conclusions de la période 1970-1989

➤ Les 3 étapes

- Mark 1, Hg/Ca/Br
- Chlorures de fer
- Famille du soufre

➤ La recherche AO des cycles :

- Exemples : Yoshida, UT, 1976, Russell, GA, 1974, Funk, 1976
 - ☞ Exemple Yoshida, 1976
- Liste éléments à utiliser
- Chaleur nucléaire disponible à 1300K
- Types de réactions (table et subroutine thermo – condition sur ΔG , pour chaque étape du cycle
- Ensemble du cycle : ΔG entre 300 et 1500

Les critères et les conclusions de la période 1970-1989

- Le nombre de réactions suivant le type est de l'ordre de 10^3 : problème d'évaluation.
- ***“ It appears that it may take a long time to discover the best reaction sequences and it may be difficult to find thermochemical processes which have an energy efficiency which exceeds that of conventional electrolysis ”*** !

Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 : figure 28

Table 2
Criteria

1	Thermal efficiency	!
2	Conversion of chemical reactions	
3	Side reactions	
4	Toxicity of elements and compounds involved	
5	Availability and cost of chemicals involved	
6	Materials separation	!
7	Corrosion problems	
8	Materials handling	
9	Maximum process temperature	!
10	Heat transfer problems	

Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 : figure 29

J.E. Funk / International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 185–190

189

Table 4

Conclusions: Ispra program

1	!	Thermochemical production of hydrogen is demonstrated and feasible.
2		Two candidate processes are selected; they are “hybrid” processes of the sulfur family.
3		Construction materials for industrial-scale plants have been identified: improved materials could be developed.
4		Overall thermal efficiency of industrial-scale processes can be higher than 35%.
5		Industrial pilot plants can already be built with the present knowledge, chemical engineering data and commercial materials are available, no critical break-through is necessary.
6		Improvements in technological solutions and chemical engineering design are still possible.
7	!	Detailed cost evaluations are not yet possible, but the hydrogen production cost, with rough estimates is nearly the same as for advanced electrolysis.
8		Strong cost reductions for hydrogen produced from water are unlikely.
9		Economic competitiveness is likely, using nuclear heat sources (HTGR) and dedicated plants of very large size.
10	!	Small-size plants are not competitive.
11		The availability of the nuclear heat source is critical — if the HTGRs are not commercialized, it is difficult to find other suitable heat sources.
12	!	Solar furnaces have critical, intrinsic difficulties, e.g., small size and discontinuity, and fusion reactors are still very far from application.
13		Important fallouts are available from the research on thermochemical hydrogen, e.g., thermodynamic data, technologies for decomposition and synthesis of sulfuric acid and, the most important, a new, very promising process for flue-gas desulfurization.
14		After this decade of research, thermochemical decomposition of water for hydrogen production was transformed from a theoretical ideal to a practical, promising reality; even if there are challenging problems for chemical and nuclear engineers, the prospects are good in the long term.

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire. !!
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H_2
- ❑ Remarques en forme de conclusions

L'énergie primaire nucléaire : perspectives d'utilisation: figure 30

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.

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

C.Royère

Les cycles "prometteurs" pour l'énergie primaire nucléaire: figure 31

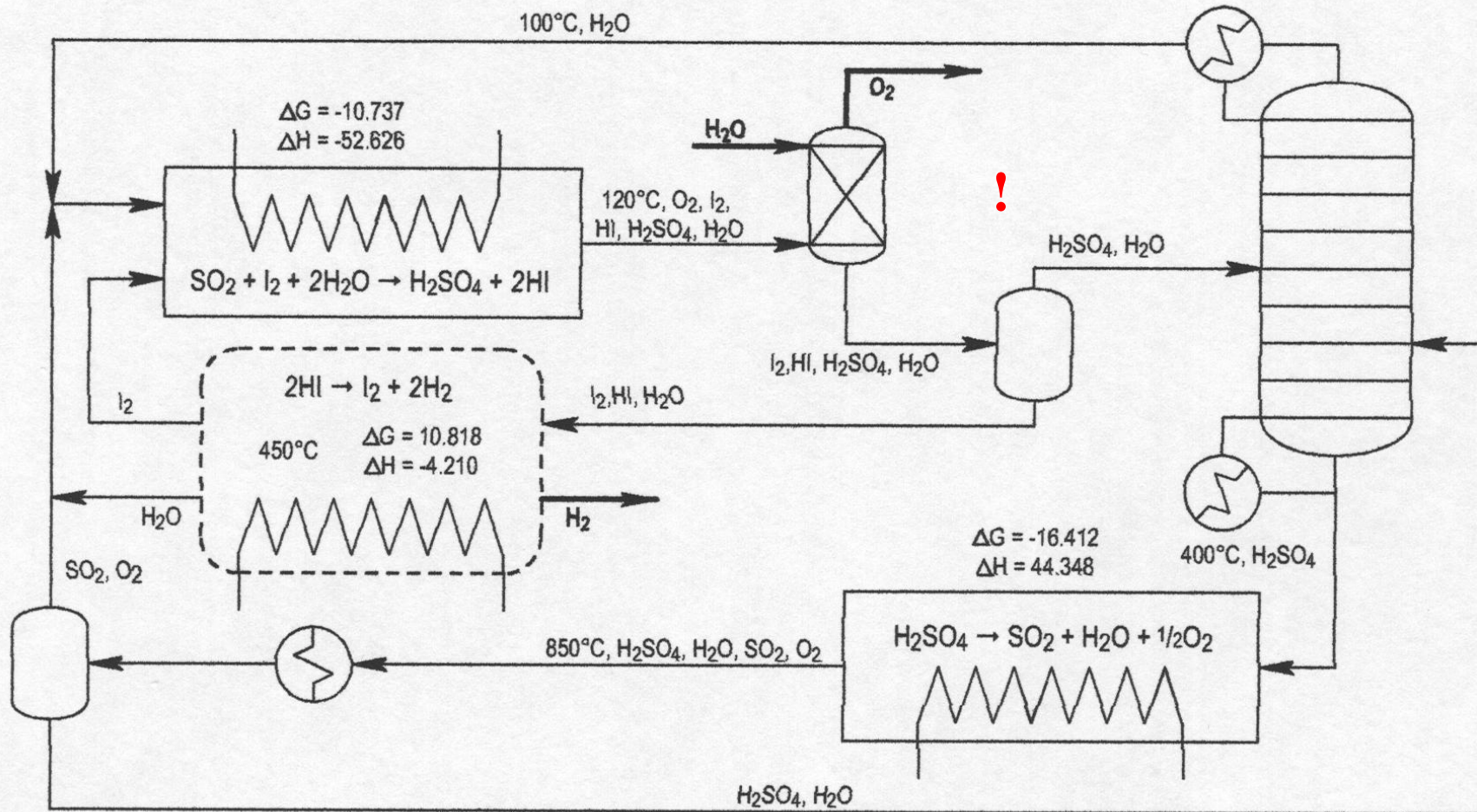


Fig. 17. Sulfur-iodine cycle process flow diagram.

Les cycles "prometteurs" pour l'énergie primaire nucléaire: figure 32

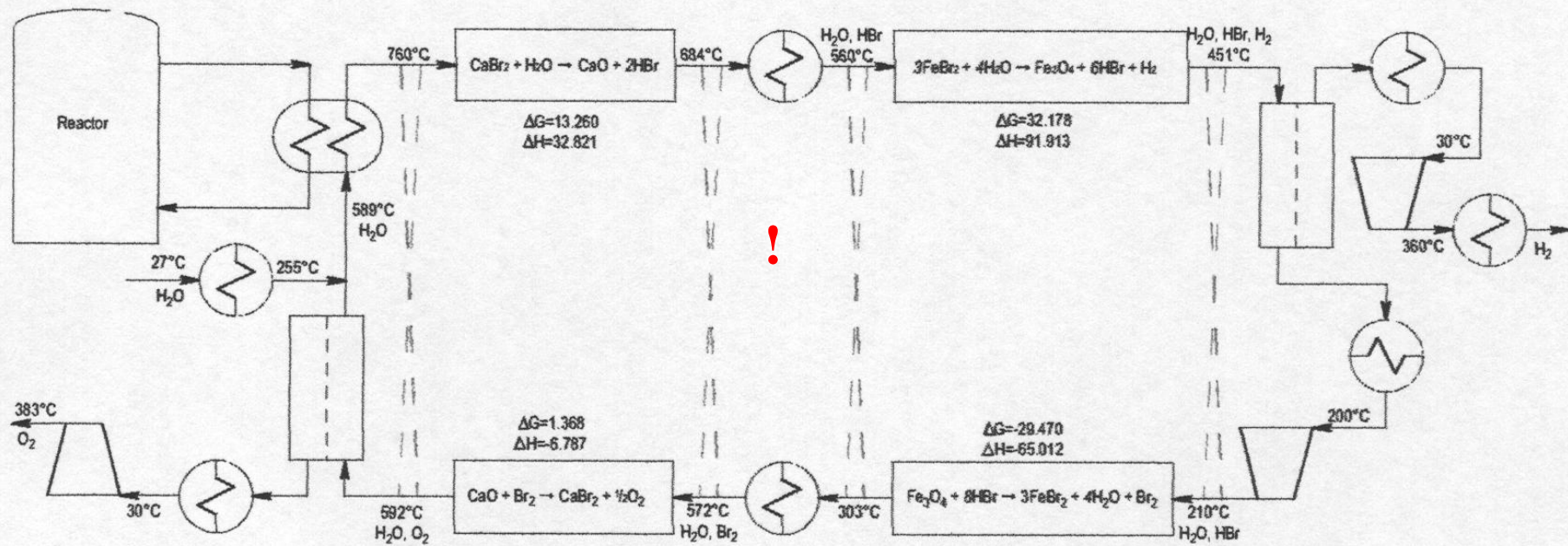


Fig. 16. Adiabatic UT-3 process flow diagram.

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire. !!
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H_2
- ❑ Remarques en forme de conclusions

Les cycles "prometteurs" pour l'énergie primaire solaire; les cycles à 2 étapes: figure 33

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

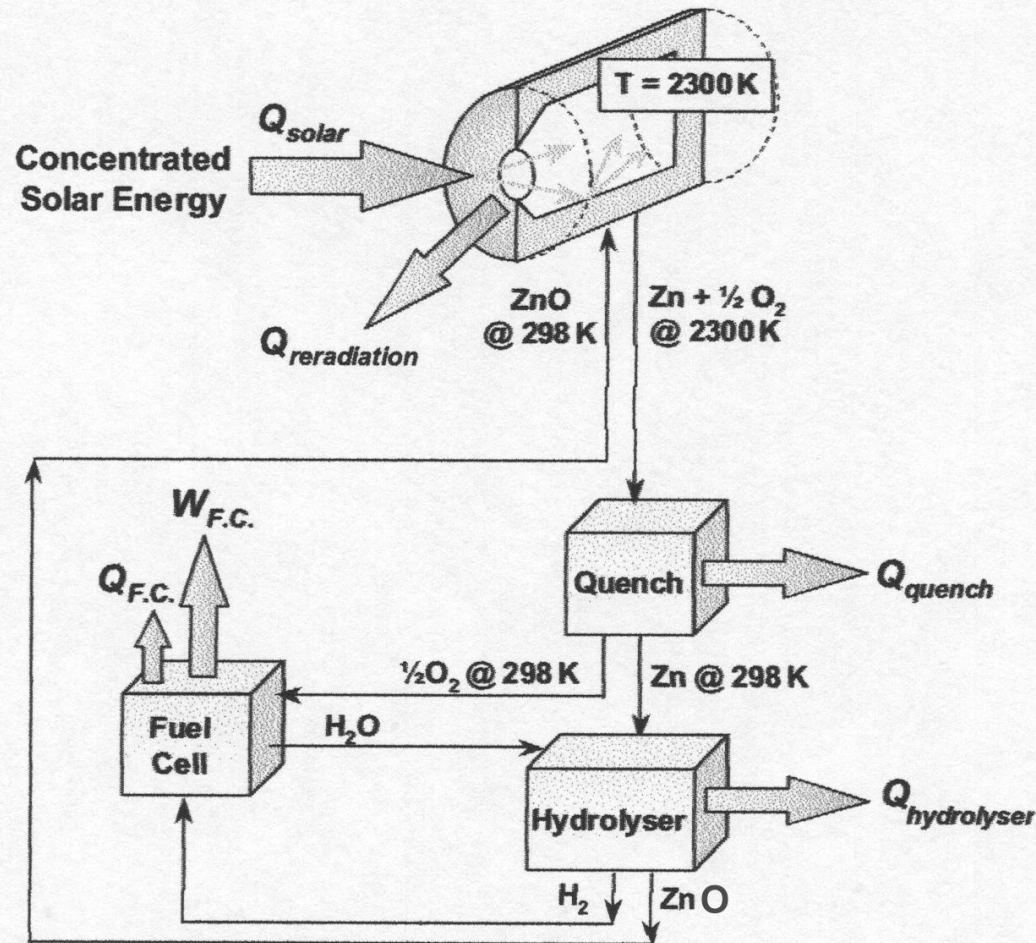
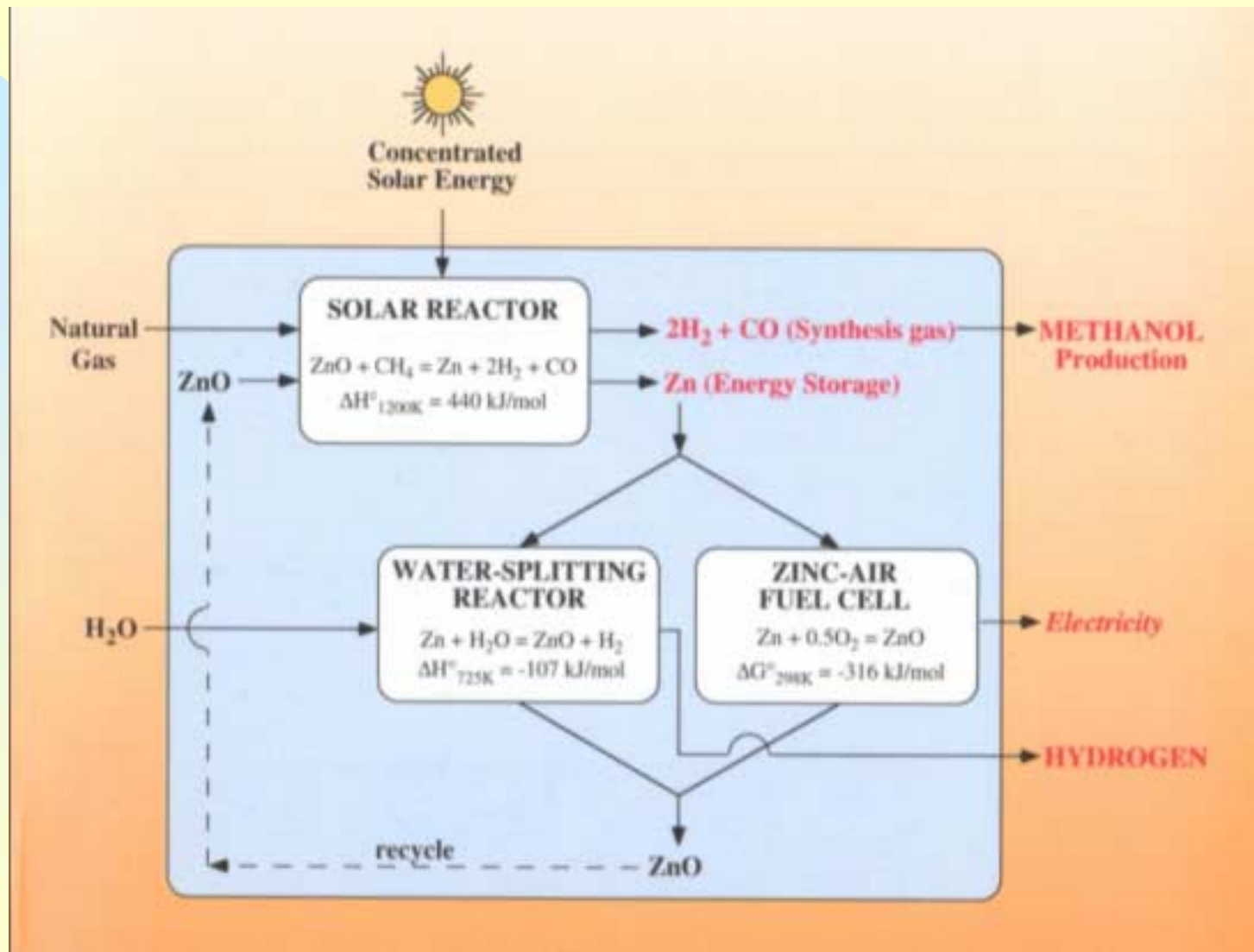


Fig. 1. Model flow diagram of the water-splitting solar thermochemical cycle used for the exergy analysis.

Les cycles "prometteurs" pour l'énergie primaire solaire : figure 34



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

- **Solar UT-3**

- ☞ Sakurai, Bilgen, 1996

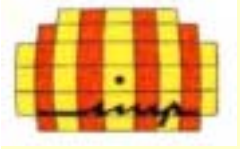
- **Solar I-S cycle**

- ☞ Solar CRISTINA process : Bilgen, Broggi, 1986

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

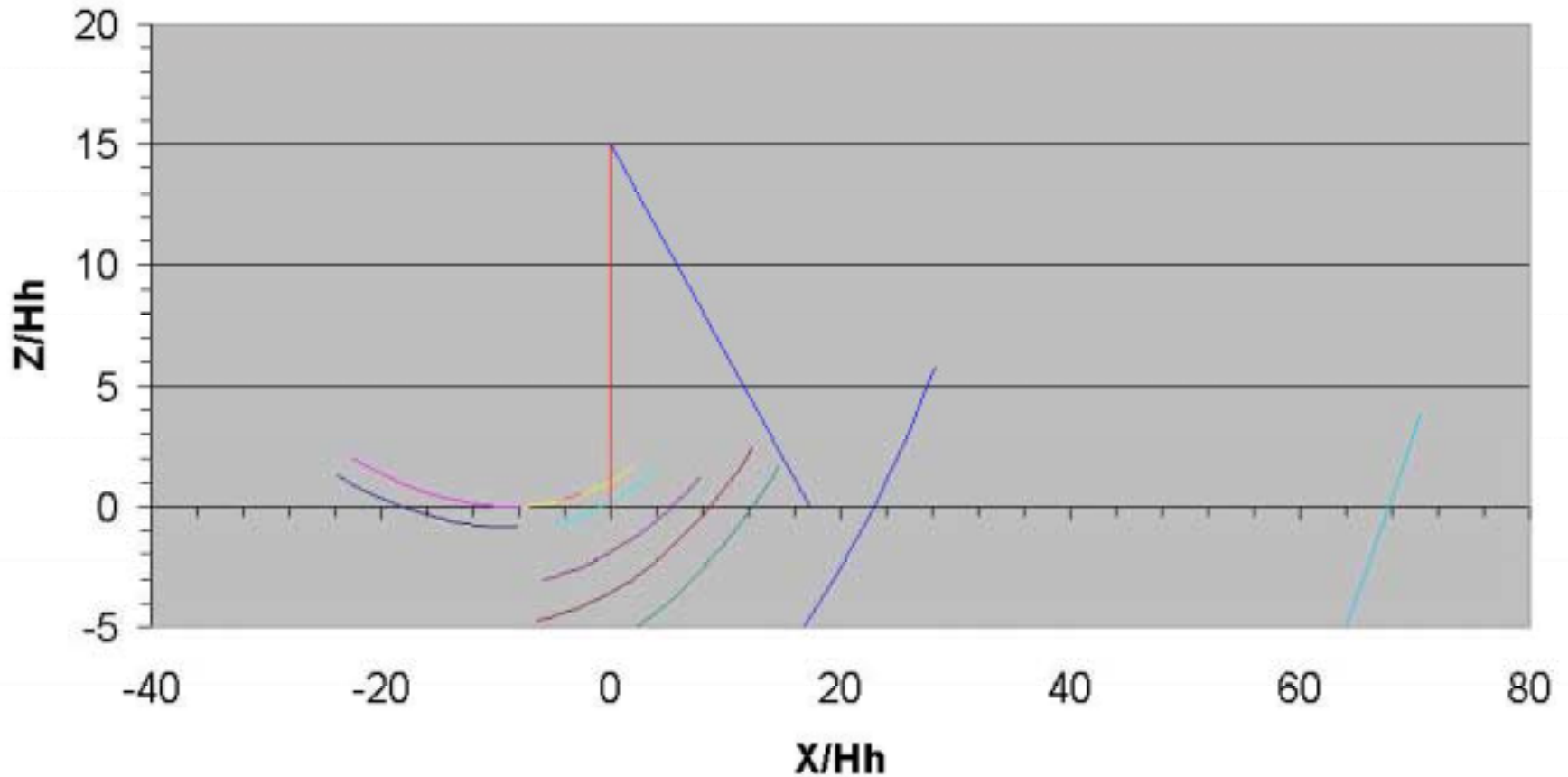
"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
 - ❑ Les outils et les bases de données.
 - ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
 - ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
 - ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
 - ❑ La concentration solaire ! !
 - ❑ Les rendements
 - ❑ Les coûts de production de H₂
 - ❑ Remarques en forme de conclusions
- C.Royère



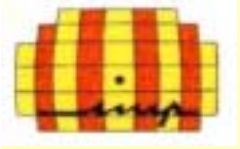
La concentration solaire : figure 35

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



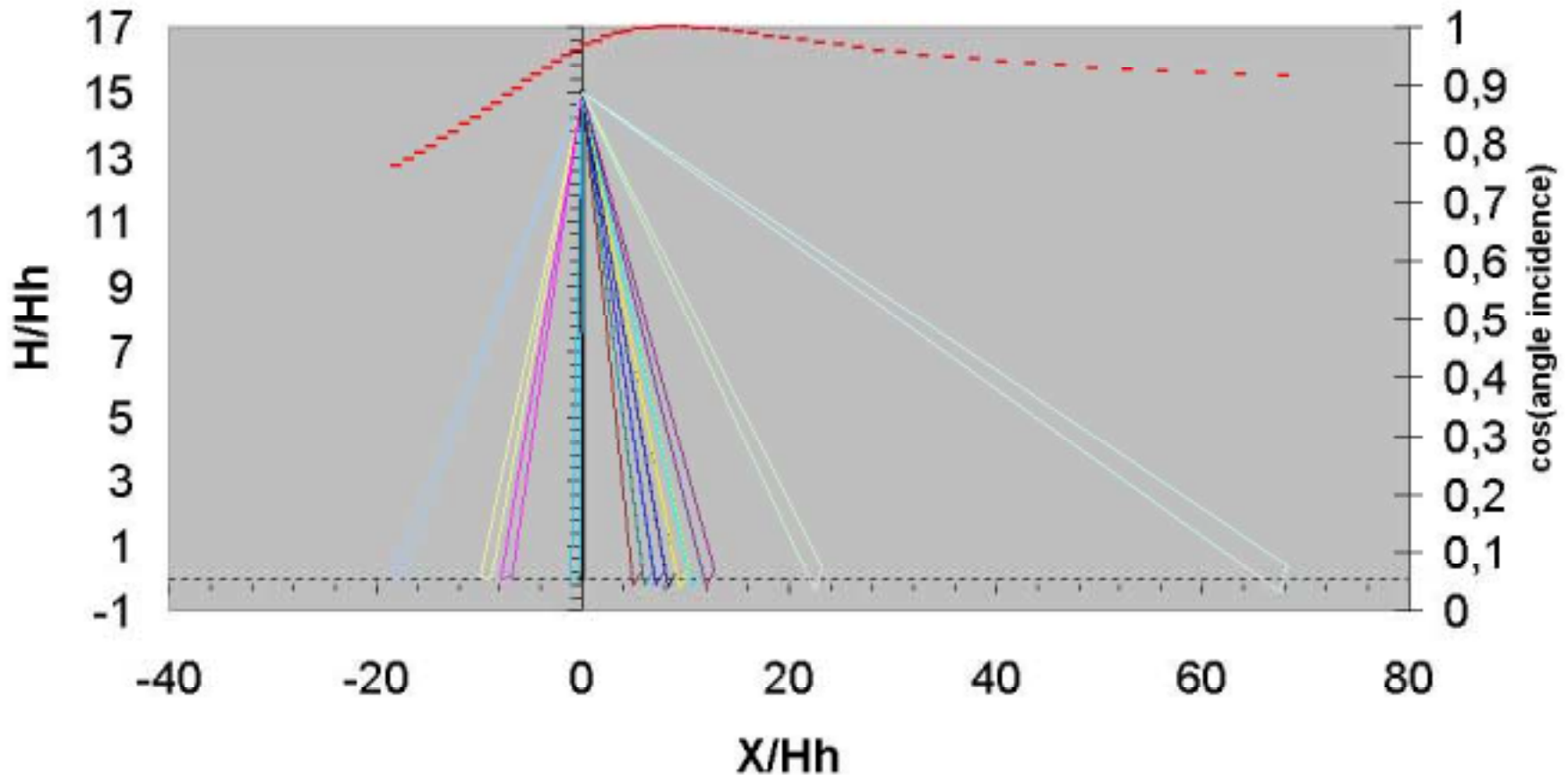
La concentration solaire:centrale de chaleur, four
solaire du futur ? méridienne - principe

C.Royère



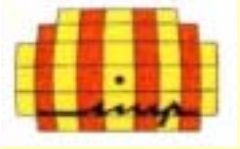
La concentration solaire : figure 36

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



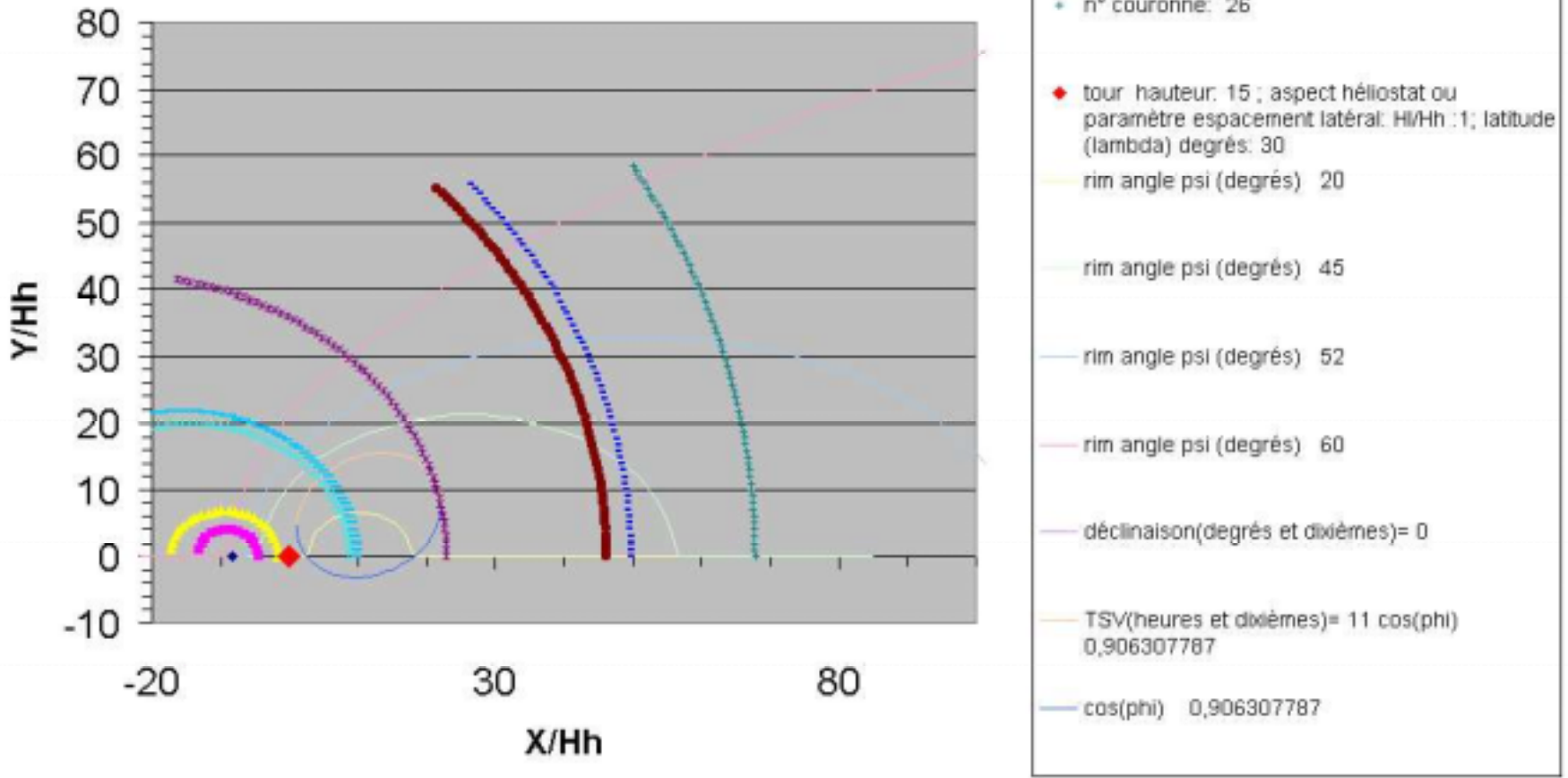
La concentration solaire:centrale de chaleur, four
solaire du futur ? méridienne et $\cos\phi$

C.Royère



La concentration solaire : figure 37

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

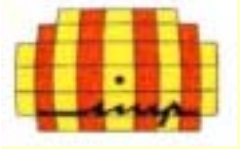


centrale de chaleur, four solaire du futur ?
couronnes et iso ϕ et ψ

C. Royère

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements ! !
- ❑ Les coûts de production de H_2
- ❑ Remarques en forme de conclusions



Les rendements: tableau 5

	Energy	Exergy
UT-3 <u>alone non adiabatic</u> HTGR primary heat (Sakurai et al. 1996a)	39,2%	
UT-3 <u>non adiabatic</u> (cogeneration : H ₂ +electricity) HTGR primary heat (Tadokoro, 1997) (Tadokoro et al. 1997)	45-48%	
UT-3 <u>alone adiabatic</u> HTGR primary heat (Sakurai, Bilgen, 1996) (Sakurai et al. 1996a)	48,9%	53,2%
UT-3 <u>alone adiabatic</u> Solar primary heat (Sakurai, Bilgen, 1996) (Sakurai et al. 1996a)	49,5	52,9
UT-3 <u>alone non adiabatic</u> Solar primary heat (Kameyama, Funk, 1994) (Kameyama and Funk 1994)	23%	
IS GA thermochemical cycle (Besenbruch et al., 2000) HTGR primary heat (Besenbruch et al. 2000a)	52%	
IS GA thermochemical cycle (Bilgen et al., 1995) HTGR (Ozturk et al. 1995)primary heat	55,5%	
IS GA thermochemical cycle (Besenbruch et al.) (Besenbruch et al. 2000a)(cogeneration : H ₂ +electricity) HTGR primary heat	60%	
Zn/ZnO (Steinfeld, 2002) (Steinfeld 2002b)		29%

Préparé par C.Royère, Septembre 2002

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

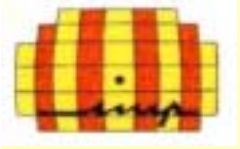
- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H_2 ! !
- ❑ Remarques en forme de conclusions

Les coûts de production de H2: tableau 6

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

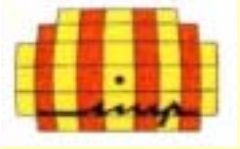
	Units	Grid electricity industrial rate	New nuclear capacity	Current electrolysis	Advanced reactor design	Advanced electrolysis
Interest rate	Per cent/year		12	12	12	12
Project lifetime	Years		20	20	20	20
Load factor	Hours/year		7 500	7 900	7 900	8 300
Capital costs	\$/kWe		2 450	600	1 120	400
Capital 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	<i>mills/kWh</i>	<i>50</i>	<i>61.77</i> ⁽⁶⁾		<i>25.81</i>	
Hydrogen production costs	<i>\$/GJ</i>	<i>25-30</i>		<i>30.7</i>		<i>13.5</i>
	<i>\$/bbl</i>	<i>140-171</i>		<i>175</i>		<i>77</i>

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.



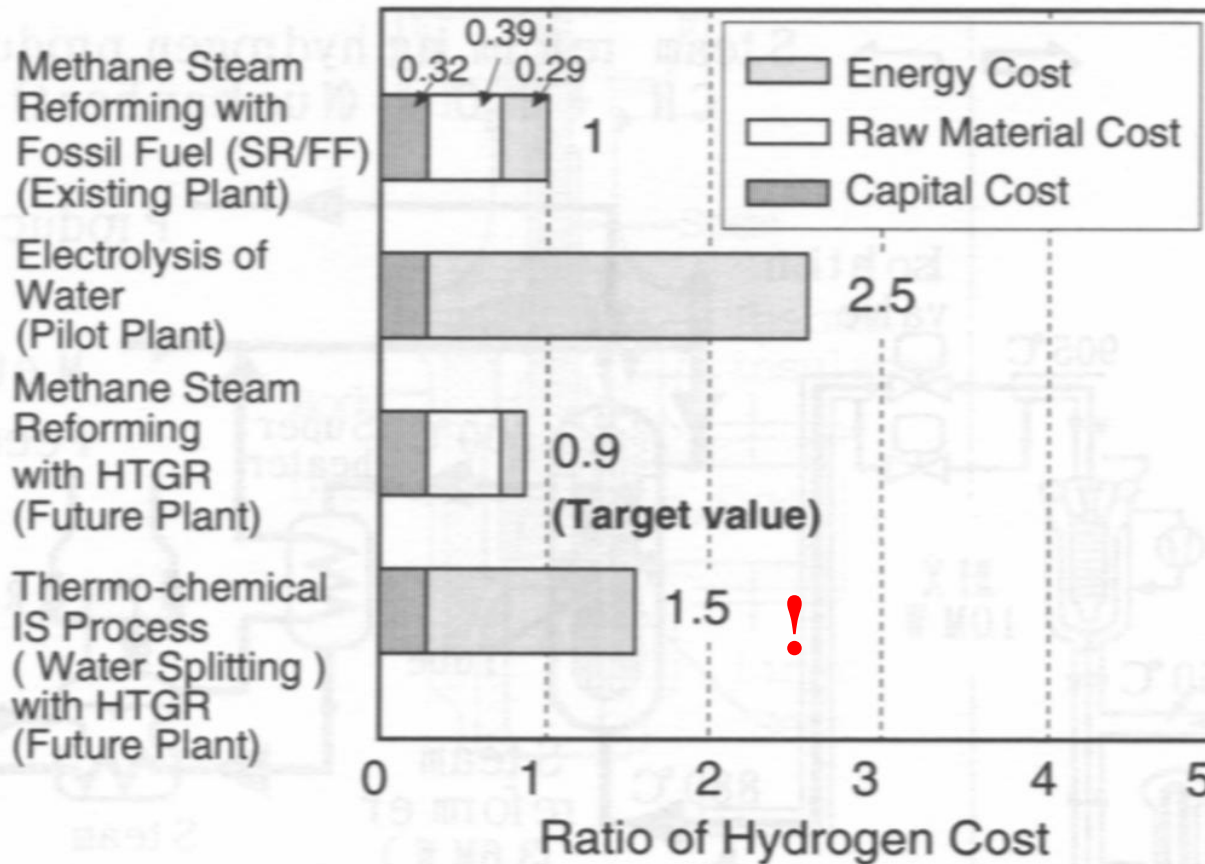
Les coûts de production : tableau 7

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		

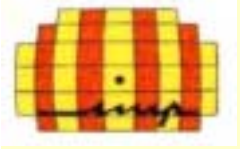


Les coûts de production: figure 38

Figure 4. Ratio of hydrogen cost

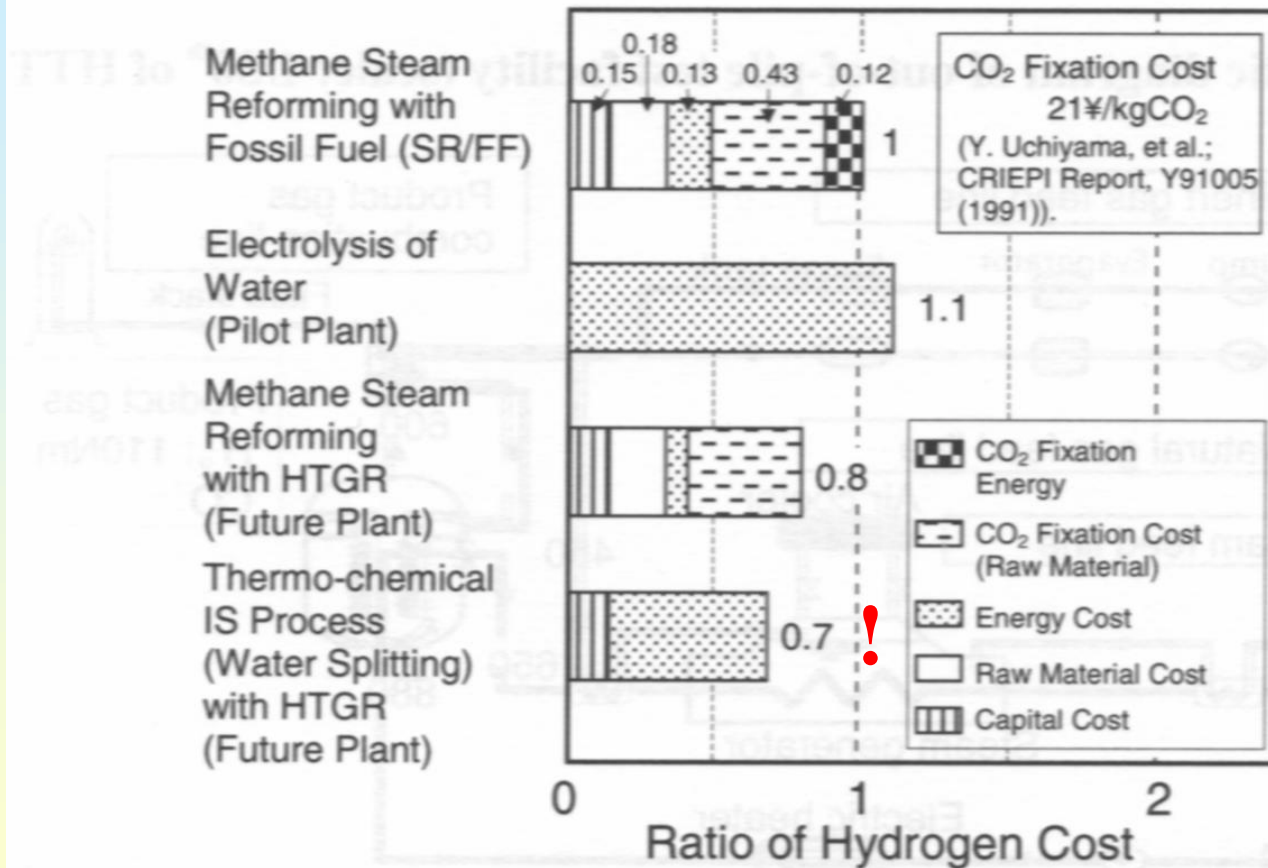


Scé : Shiozawa et al. JAERI, HTGR-HTTR
project, NEA-OCDE, 2000

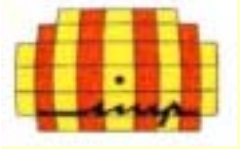


Les coûts de production: figure 39

Figure 5. Ratio of hydrogen cost in the case of CO₂ fixation



Scé : Shiozawa et al. JAERI, HTGR-HTTR
project, NEA-OCDE, 2000



Les coûts de production: données figure 40

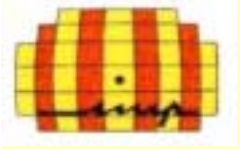
Economic assumptions span a wide range

Description	NH ₂			
	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



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



Les coûts de production: figure 41

Example of Busbar H₂ Cost Estimates

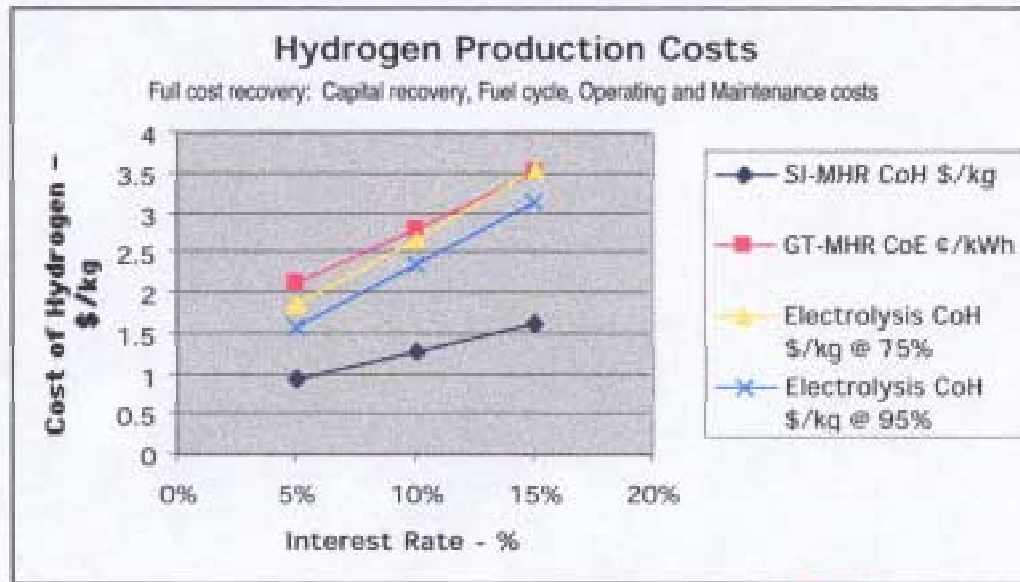
NH₂

Nuclear Hydrogen



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

Electrolysis at Stuart Energy goal of \$250/kWe



GENERAL ATOMICS

(cf sup. ; sce : GA Golden 2002)

Les coûts de production : tableau 8-a

Kaarstad (1997) (Kaarstad and Audus 1997)	
Nat Gas	3 \$/GJ
Coal	2 \$/GJ
Electricity from Hydro	10 \$/GJ (3,6 US\$/kWh)
Petroleum	35 \$/bl (6,10 US\$/GJ 7,32 US\$/kWh – 0,3 eff)
<u>Hydrogen production costs</u>	
H2 from Nat. Gas	5,6 US\$/GJ
H2 from Nat. Gas + CO ₂ sequ	6,9 US\$/GJ
H2 from coal + CO ₂ sequ	13,2 US\$/GJ
H2 from electrolysis (electricity from hydro)	20 US\$/GJ
<u>Electricity production costs</u>	
Electricity from Hydro	10 US\$/GJ (3,6 US\$/kWh)
Electricity from new coal plant	12,5 US\$/GJ (4,5 US\$/kWh)
Electricity from Nat Gas (3 US\$/GJ) + CO ₂ removed and stored	18,8 US\$/GJ (6,8 US\$/kWh)
Electricity from Coal + CO ₂ removed and stored	21,9 US\$/GJ (7,9 US\$/kWh)

Scs : Kaarstad (1997)

C.Royère

Les coûts de production : tableau 8-b

Gaudernack, 1998 (Gaudernack and Lynam 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)

Sce : Gaudernack, 1998; Steinfeld, 2002

C.Royère

Les coûts de production : tableau 8-c

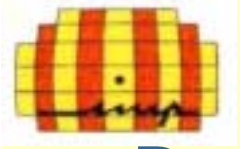
Rogner, 2001 (Rogner and Scott 2001)	US\$/GJ electricity	US\$/GJ H ₂ from electrolysis
Grid electricity 50 mills/kWh	13,9	25-30
New nuclear plants electricity 62 mills/kWh	17,2	31
Current average nuclear electricity 20 mills/kWh	5,6	13
Advanced reactor designs electricity 20 mills/kWh	7,2	13,5
IS GA thermochemical cycle (55,5 % eff, Bilgen et al., 1995) (Ozturk et al. 1995) HTGR primary heat (1,7-6,9 US\$/GJ)	3-12,4 US\$/GJ (H2 production energy cost)	
UT-3 thermochemical cycle 45% eff with membrane gas separator, cogeneration (nuclear HTGR heat : 6 US\$/GJ) (Tadokoro, 1997) (Tadokoro et al. 1997)	27,5 US\$/GJ (H ₂ production cost)	
Préparé par C.Royère, Septembre 2002		

Sce : Rogner, 2000; Bilgen et al., 1995; Tadokoro, 1997

"Production d'hydrogène par cycles thermochimiques : passé, présent, énergie primaire solaire ou nucléaire?"

- ❑ Les sources d'information.
- ❑ Les outils et les bases de données.
- ❑ Les critères et les conclusions de la période 1970-1989 ('décennie 1970')
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire nucléaire.
- ❑ Les cycles " prometteurs " pour l'énergie primaire solaire.
- ❑ La concentration solaire
- ❑ Les rendements
- ❑ Les coûts de production de H_2
- ❑ Remarques en forme de conclusions



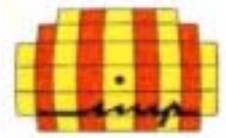


Remarques en forme de conclusions

- Après la période d'intense activité (1970-1985) pour développer l'utilisation de l'énergie primaire nucléaire (ou solaire) dans la production d'hydrogène par cycles thermochimiques, une longue période (1985-1995) de désaffection du nucléaire a succédé ;
- Ce désengagement a été général à l'échelle mondiale sauf au Japon où le JAERI a poursuivi des travaux en partie dans le cadre de l' IAEA.
- Les atteintes à l'environnement par les GES favorisent actuellement un regain d'intérêt des programmes R&D sur l'hydrogène (nucléaire & solaire) comme vecteur d'énergie, carburant et matière première pour l'industrie (métallurgie, chimie, pétrochimie, carbochimie).

Remarques en forme de conclusions

- Le nucléaire contribue actuellement à hauteur de 17% à la production d'électricité à l'échelle mondiale et seulement à 7% de l'énergie primaire : “ ***Save a few exceptions, including electricity generation, the diverse applicability of nuclear energy which was envisioned at the start of the nuclear age has not yet been put into widespread practice*** ” (NEA-OECD, october 2000).
- La question posée est: decarbonisation des combustibles fossiles et coût réel des combustibles.
- Hydrogène “ nucléaire ” par cycle thermochimique au-dessous de 900°C.
- Hydrogène “ solaire ” par cycle thermochimique : au-dessus de 900 °C ?
- Les recherches récentes, en cours ou à mener ,
quelques exemples:



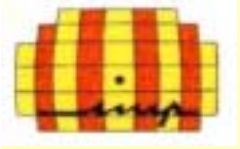
Les recherches récentes, en cours ou à mener

■ 1.UT-3

- Séparateur à membranes (Tadokoro, 1997)
- Procédé adiabatique énergie primaire nucléaire ou solaire (Sakurai, 1996)
- Matériaux et mécanismes de réaction (Ca Br₂ pellets, Sakurai, 1996)

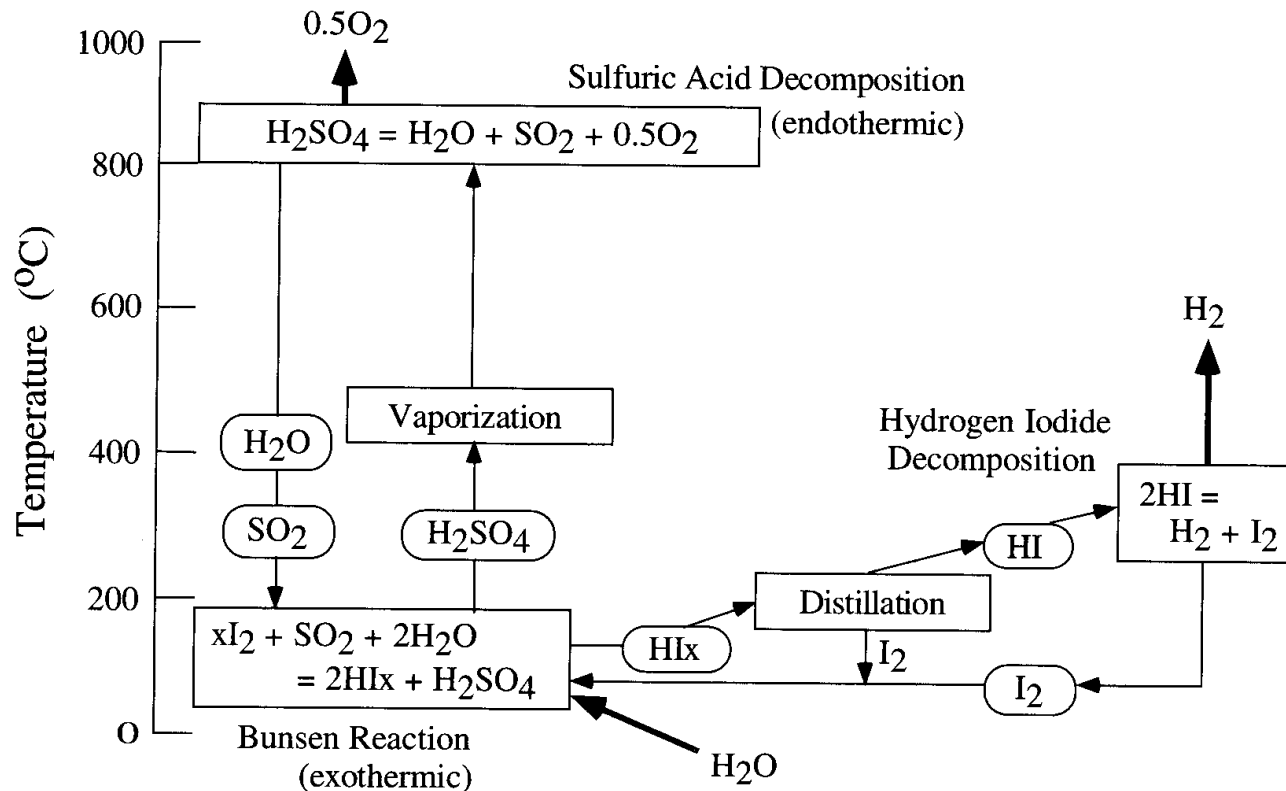
■ 2.I-S

- H₂/H₂O/HI separation membrane, CVD SiO₂ film (Hwang, 2000)
- CeO₂ as a recycle reagent (Onstott, 1995, 1997)
- Separation et distillation de la phase HIx (Sakurai, 1999, 2000)
- Flowsheet Shimizu, UT, 2000
- Pilotes (Shiozawa, JAERI, 2000)

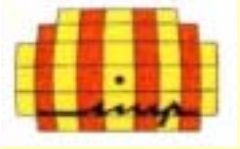


Les recherches récentes, en cours ou à mener : figure 42

Figure 1. Schematic flowsheet of IS process

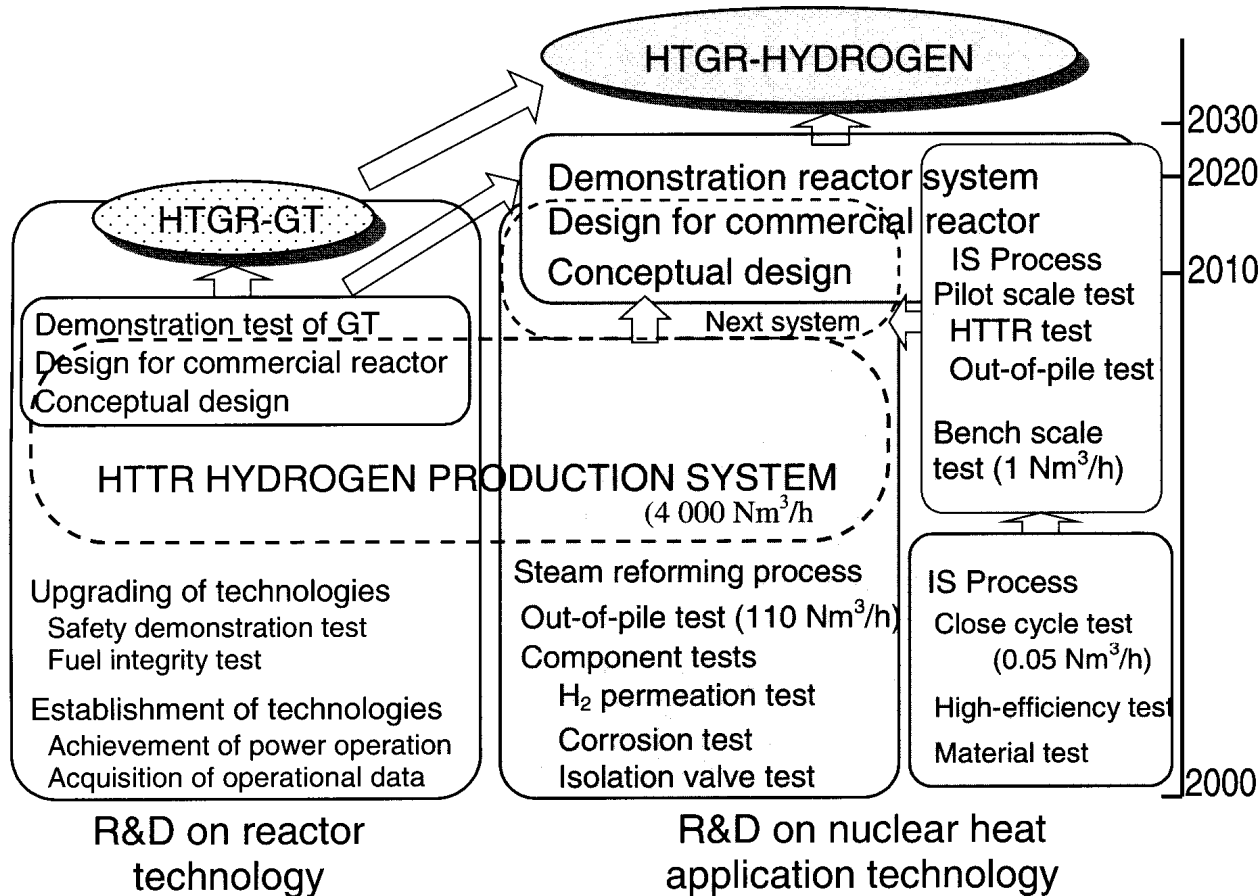


Flowsheet Shimizu, UT, 2000 (Sce : Shimizu, UT, NEA-OECD, 2000)



Les recherches récentes, en cours ou à mener : figure 43

Figure 3. Outline of HTTR project



Pilotes (Shiozawa, JAERI, 2000)

Les recherches récentes, en cours ou à mener

■ 3.Zn-ZnO

- cycle Zn-ZnO et études cinétiques connexes sur le système Zn-O et sur la Wüstite, principalement par PSI, LSGC et Weizmann Institute : (Möller and Palumbo 2001; Palumbo et al. 1998; Steinfeld 2002a; Steinfeld et al. 1999; Weidenkaff et al. 1999; Weidenkaff et al. 2000)

■ 4.Evaluation comparative des rendements des procédés de production d'hydrogène :

- (Rosen 1996; Rosen and Scott 1998)

■ 5.Recherche des cycles assistée par ordinateur :

- (Lundberg 1993a; Sim et al. 1993)

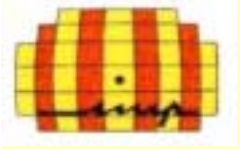
Les recherches récentes, en cours ou à mener

■ 6. Direct thermal H₂O decomposition reaction

- (Kogan, 1997, 2000) (Kogan 1997; Kogan 1998; Kogan 2000; Kogan et al. 2000)
- in membrane solar reactor (Ohya, 2002) (Ohya et al. 2002)
- zeolites (Momirlan, 2000-2002) (Momirlan 2000; Momirlan and Boriaru 2000; Momirlan and Veziroglu 2002)

■ 7. H₂ production

- H₂O/Zn/Fe₃O₄ system (Tamura, 2001, Kaneko, 2002) (Kaneko et al. 2002; Tamura et al. 2001)
- Solar 2-step water-splitting ferrite thermochemical cycle (Tamura, Steinfeld, 1995) (Berman and Epstein 2000; Tamura et al. 1995)



Les recherches récentes, en cours ou à mener

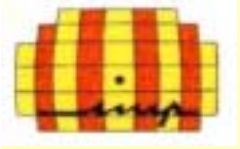
- MnFe_2O_4 - Na_2CO_3 system (Kaneko, 2001, 2002) (Kaneko et al. 2001)
- CEA : UT-3, I-S, SnO_2 , CeO_2 (Marcoule, Saclay)
- Solar driven High temperature electrolysis (Licht, 2002) (Licht 2002)

■ 8. Coal and water conversion

- 2-step redox ferrite and Ni ferrite cycle (Kodama, 1996, 1997) (Kodama et al. 1997; Kodama et al. 1996)
 - Na-C-H-O system (Saxena, 2002) (Saxena 2002)
- C. Royère

Les recherches récentes, en cours ou à mener

- **9. Les conclusions de Brown et al. (GA) AIChE paper 139 March 2002 (US DOE NERI Grants):**
 - 115 cycles, 800 references :UT-3 (35-40%) and IS (52%) for advanced high temperature nuclear reactor heat source.
 - HTGR : Helium Gas-cooled Reactor (Modular Helium Reactor and Pebble Bed Modular Reactor)
 - Preliminary engineering design
 - Developing the material and energy balances
 - Specifications for the chemical process equipment for the cost estimates
 - Nuclear power costs still unknown (parameter);
 - Evaluation of S-I cycle and its chemistry
 - Recommendations for steps to bring the process to the point of commercialization

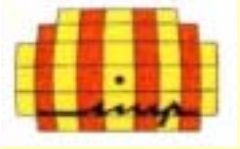


Les recherches récentes, en cours ou à mener : figure 44-a

Research on thermochemical water-splitting cycles began about 40 years ago, and since that time many cycles have been published. However, not many have been put through the rigorous chemical engineering process of detailed thermodynamic calculations, laboratory testing to verify the calculations or to develop necessary chemical and physical properties, preparation of process flowsheets including



■ 7. James E. FUNK conclusions (Funk 2001)

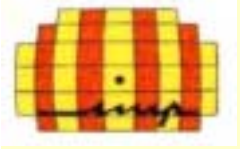


Les recherches récentes, en cours ou à mener : figure 44-b

mass and energy balances and showing flow, temperature, pressure and composition throughout the process, equipment design, and finally making the cost estimates which yield both capital and operating costs. Where this has been done, the cost numbers do not look good when compared with those for hydrogen production by natural gas reforming. We must accept the fact that this is not a valid comparison. The comparison should be made with processes which use renewable sources, do not use carbon-based sources, and do not emit carbon dioxide. Thermochemical water-splitting processes will look much better in such a comparison. Furthermore, large amounts of hydrogen will be needed to make a substantial substitution for carbon-based fuels. Thermochemical processes will benefit from the well-known and used-scaling techniques and economies of scale of the chemical industry. A better understanding and use of the relationship among process thermal efficiency, capital costs, and thermodynamic irreversibilities may lead to lower production costs. While some of this sort of work has been

!

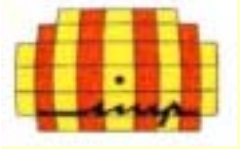
- 7. James E. FUNK conclusions (Funk 2001)



Les recherches récentes, en cours ou à mener : figure 44-c

done, more remains for the future. Another item for the future is the discovery of a viable two-reaction process, ! which offers the potential for high efficiency and low cost. Some work has been done on this problem, but more needs to be done in the future.

- **7. James E. FUNK conclusions (Funk 2001)**



Des solutions d'attente ? qui donneraient du temps pour la R&D: tableau 9

Electricity at 0,045 US\$/kWh ----->-----H₂ 24 US\$/GJ
electrolysis



Nat. Gas at 3 US\$/GJ----->-----H₂
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