Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 100 (1974)
Heft: 24

Artikel: Tableau énergétique mondial
Autor: Morf, J.-J. / Roux, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72143

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

mentale de notre situation humaine est notre antagonisme vis-à-vis de la nature. Mais nous connaissons aussi la notion de symbiose avec la nature, qui s'est manifestée au cours des siècles sous des aspects très variés. L'idée du retour à la nature a revêtu des formes religieuses, philosophiques, littéraires ou même sportives. La démarche de l'homme vers la maîtrise de son environnement n'a jamais été aussi inconsciente qu'une critique facile de nos structures techniques, sociales ou politiques voudrait le faire paraître. Plus nous nous approchons de certaines limites de nos possibilités de domination, plus il devient scientifiquement possible de les discerner, de les décrire et de les populariser. Il est aujourd'hui vain de reprocher à nos oracles d'hier, politiques ou scientifiques, de n'avoir pu prédire notre situation et nos connaissances actuelles. Le travail exigé de notre génération, de vous, Messieurs, n'est plus de se perdre en considérations oiseuses sur des éventualités ou des responsabilités, mais d'entreprendre l'exploration scientifique des limites qui se dressent avec une clarté croissante devant nous. Ce travail doit conduire à éviter ou à surmonter les obstacles. Souvent ce sont les mêmes outils scientifiques qui nous permettent de maîtriser notre environnement et nous servent à évaluer les limitations que nous devons imposer à notre activité terrestre. Nous devons aujourd'hui supposer que la démarche de l'homme vers son avenir suivra un chemin plus sinueux qu'il ne pouvait être prévu il y a quelques décennies seulement. Cette situation, peu enthousiasmante pour certains, a été à l'origine de prises de position antiscientifiques et antitechniques. Certains intellectuels prônent le retour en arrière, le renoncement de l'humanité au travail intelligent et à sa suprématie. La conséquence finale d'un tel comportement serait la réintégration de l'homme dans le règne animal. L'évocation de cette extrémité fait instantanément apparaître son irréalisme. Nous pouvons et devons donc affirmer que, face aux problèmes soulevés par les limites à la croissance de l'emprise humaine, la démarche des hommes scientifiques et techniques ne sera ni la marche aveugle en avant ni le retour en arrière. C'est sur la base d'intelligence, de prudence et de confiance en nous-mêmes que nous devons choisir notre chemin.

Dans le tableau d'ensemble très généralisé et très succinct que je me suis permis de brosser, nous allons reporter notre attention plus spécifiquement sur le secteur de l'énergie qui est le sujet de ces réunions. A la vue de nos connaissances actuelles nous devons considérer l'utilisation artificielle de l'énergie comme un problème clef de la symbiose humanité-environnement. Pour satisfaire à nos besoins d'énergie nous avons appauvri notre globe en charbon à partir du XIXe siècle et en pétrole à partir du XXe siècle. C'est aussi par suite de ce gaspillage d'énergie que nous pouvons pour la première fois dans l'histoire de l'humanité en constater l'influence sur les conditions biologiques ou plus précisément climatiques, en certains endroits du monde. Ces effets sont certes minimes et n'ont causé aucun préjudice mesurable, ils méritent néanmoins notre attention. Ce seront donc ces deux aspects — appauvrissement de la substance terrestre et modification des conditions biologiques — qui influenceront la recherche dans le domaine de l'énergie.

Le problème de l'appauvrissement de nos réserves peut être traité dans le cadre des méthodes statistiques. Les grandeurs de référence pour le traitement des questions d'équilibre biologique ou simplement thermique sont par contre très spéculatives. Il sera en effet toujours difficile de fixer une limite acceptable pour les modifications de notre régime thermique. Une chose est pourtant certaine, la nature elle-même n'a jamais été statique. Nous ne pouvons donc pas, en dehors de toute intervention humaine, exclure des instabilités naturelles telles que des époques glaciaires ou des progressions de zones désertiques. Face à une nature qui se donne une large latitude d'instabilité, la société humaine ne pourra survivre sans utiliser elle aussi une bande de tolérance raisonnable. Un fanatisme intolérant de l'environnement jetterait notre monde dans un chaos politique et social meurtrier aussi sûrement que la négligence totale de ce facteur. C'est aux scientifiques et aux techniciens qu'il appartient en grande partie d'amener la société à comprendre et à accepter une modification limitée de notre équilibre naturel.

Pour terminer, je voudrais remercier le comité d'organisation et tout particulièrement Monsieur le professeur Morf pour son effort intense en vue de garantir le succès de ces journées d'information. J'adresse aussi un salut cordial aux conférenciers, plus particulièrement à ceux d'entre eux qui viennent de l'étranger.

J'ai le plaisir de déclarer les journées d'information ouvertes et je vous souhaite à tous des débats utiles et passionnants.

Tableau énergétique mondial

par J.-J. MORF, Lausanne et M. ROUX, Berne

Pour situer les sources d'énergie non conventionnelles par rapport aux sources usuelles, le tableau de la *figure 1a et 1b* indique les puissances moyennes brutes que l'humanité a tirées des diverses sources d'énergie primaire en 1970.

Toutes les consommations annuelles d'énergie ont été transformées en termes de puissances moyennes et exprimées en gigawatts (GW).

Un gigawatt de puissance moyenne brute correspond à peu près à :

800 000 tonnes de pétrole par an ou
5 millions de barils de pétrole par an ou
1,1 millions de tonnes de charbon par an ou
7500 téracalories par an ou
$3 \cdot 10^{13}$ BTU par an ou
8,76 milliards de kWh *bruts* (ou thermiques) par an.

Au besoin, les tableaux des *figures 2 et 3* donnent d'autres facteurs de conversion.

Pour situer le gigawatt, rappelons qu'une grande centrale thermique moderne produit environ 3 GW sous forme d'énergie brute (thermique), permettant d'obtenir 1 GW sous forme électrique.

D'après la *figure 1*, le monde consommait 6000 à 7000 GW bruts en 1970. La part de la Suisse se montait alors à 19 GW.

(Contrairement à la pratique utilisée dans l'élaboration des statistiques des Etats-Unis et des Nations-Unies, nous avons renoncé à valoriser artificiellement l'énergie hydraulique par un facteur 2,4 à 2,8).

La consommation d'énergie exprimée en puissance moyenne brute par habitant peut s'exprimer aussi bien en kW/hab qu'en GW/Mhab (gigawatts bruts par million d'habitants). Il est usuel de souligner que cette grandeur semble reliée au produit national brut par habitant. La *figure 4* montre cette relation entre consommation d'éner-

Sources d'énergie conventionnelles.

1970		Monde	Europe Occident.	URSS + Europe Comm.	Amérique du Nord	Amérique Centrale et du Sud	Moyen-Orient	Chine + Asie Comm.	Asie + Océanie	Afrique	Autres
Charbon	Extr.		346	730	516		6,4	362			
	Consom.	2190	403	703	452		6,4	361			
Pétrole	Extr.		22,8	443	674	281	830	23,8		350	
	Consom.	2740	690	378	938		44,8	32,8	289		
Gaz	Extr.		96	282	835		23,8				
	Consom.	1310	99	286	820		22,8				
Bois[1]	Extr.										
	Consom.	< 10									
Tourbe	Extr.										
	Consom.	< 100									
En. hydraulique	Consom.	134	38,5	15,6	46,7		0,65	5,1	13		
Nucléaire	Extr.	6,4	0,5		4,7				0,1	1,2	
	Consom.	27	16,5	1,5	8,6				0,4		

Fig. 1a. — Répartition de l'extraction et de la consommation par sources, en GW bruts.

Sources d'énergie non conventionnelles.

1970		Monde	Europe Occident.	URSS + Europe Comm.	Amérique du Nord	Amérique Centrale	Moyen-Orient	Chine + Asie Comm.	Asie + Océanie	Afrique	Autres
Eolienne	Extraction et consommation										
Géothermique[2]		7,2	3,18	0,55	0,56	0,56			2,34		
Marémotrice[3]		~ 0,5									
Houle											
Energie therm. des mers											
Fusion											
Surgénérateur		~0,4									
Solaire											
Total		6000 ÷ 7000									
Références XXIe		30000									

Fig. 1b. — Répartition de l'extraction et de la consommation par sources, en GW bruts.

[1] Suisse : 0,35 GW, soit 1,6 % de sa consommation totale d'énergie.

[2] Suppose un rendement énergétique chaleur-électricité d'environ 10 %.

[3] Rance : production estimée aux 12 % du contenu énergétique global du bassin (remplissage et vidange).

Sources : World Energy Supplies 1968-1971, ST/STAT/SER.J/16, United Nations.
Références de : LRP 63/73, EPF-Lausanne.
Statistiques de l'énergie 1958-1972, OCDE 1974.
Uranium, Resources, Production and Demand, OCDE-IAEA 1973.

gie et PNB pour différents pays en 1968 ; (d'après : *Il problema dell'energia al soglie degli anni Settante*, Enciclopedia della Scienza e della Tecnica Mondadori, S e T 72, *21*) ; on y a ajouté la nouvelle position de la Suisse et des USA en 1973 (consommation brute de 3,54 kW/hab et un PNB de 20 000 fr/hab, respectivement 11,4 kW/hab et 17 800 fr/hab ; PNB selon informations *24 Heures* du 19 novembre 1973 et du 15 février 1974). Bien entendu, le PNB en francs suisses par habitant « valse » comme le cours des changes et n'est pas une évaluation du « bonheur humain ».

En 1970, la consommation énergétique mondiale exprimée en puissance moyenne brute était de 6000 à 7000 GW pour 3,65 milliards d'habitants, soit *1,75 kW/hab*. En admettant que la sagesse des nations arrive à stopper la croissance démographique aux alentours de 6 milliards d'habitants et à modérer la demande d'énergie en moyenne à 5 kW/hab (moitié de la consommation des USA en 1970), on pourrait tendre vers une croissance zéro de la consommation globale d'énergie exprimée en puissance moyenne brute aux alentours de 30 000 GW dans le courant du XXIe siècle. Mais c'est là une vue très optimiste des choses.

Si on admet, au contraire, que la demande et la production continueront à croître suivant la progression géométrique du doublement tous les quinze ans, on arrive aux chiffres suivants :

1985	environ	12 500	GW
2000	»	25 000	»
2015	»	50 000	»
2030	»	100 000	»
.....			
2075	»	800 000	»

Personne n'est en mesure aujourd'hui de prédire comment va croître la demande d'énergie au cours du prochain siècle. Par contre, on peut certifier sans grand risque de se tromper que la consommation énergétique mondiale exprimée en puissance moyenne atteindra *30 000 GW bruts* au cours du XXIe siècle, au début du siècle ou vers la fin, selon les prévisions (voir *figure 5*).

Tableau de conversion — Puissance

Unité	GW
1 kWh/an	$1{,}141\ 10^{-10}$
1 TWh/an	0,114
1 GWh/mois	$1{,}37\ 10^{-3}$
1 MWh/jour	$4{,}17\ 10^{-5}$
1 MW-jour/an	$2{,}738\ 10^{-6}$
1 kcal/an*	$1{,}326\ 10^{-13}$
1 thermie/an*	$1{,}326\ 10^{-10}$
1 BTU/an*	$3{,}343\ 10^{-14}$
1 Q/an*	$3{,}343\ 10^{4}$
1 tec/an*	$8{,}2 - 9{,}8\ 10^{-7}$
1 tep/an*	$1{,}1 - 1{,}5\ 10^{-6}$
1 teg/an*	$1{,}0 - 1{,}5\ 10^{-6}$
1 Nm^3/an*	$1{,}0 - 1{,}2\ 10^{-9}$
1 baril U.S./an*	$\sim 1{,}9\ 10^{-7}$
1 t U^{235}/an*	~ 3
1 t U^{238}/an*	$\sim 2{,}2$
1 t D/an*	10,7
1 t Li^6/an*	11,4

* Les statisticiens des USA et des Nations Unies utilisent en général des facteurs de conversion tenant compte d'un rendement moyen des usines électriques. Nous avons écarté cette présentation.

Fig. 2. — Conversion d'énergies annuelles consommées en terme de puissance moyenne en gigawatts (GW).

Tableau de conversion — Energie

Unité	kWh	Joules	GW·an
1 kWh	1	$3{,}6\ 10^{6}$	$1{,}141\ 10^{-10}$
1 kW-an	$8{,}765\ 10^{3}$	$3{,}156\ 10^{10}$	$1\ 10^{-6}$
1 TWh	10^{9}	$3{,}6\ 10^{15}$	0,114
1 MW-jour	$2{,}4\ 10^{4}$	$8{,}64\ 10^{10}$	$2{,}738\ 10^{-6}$
1 kcal (moyenne)	$1{,}163\ 10^{-3}$	$4{,}186\ 10^{3}$	$1{,}327\ 10^{-13}$
1 Thermie (10^3 kcal)	1,163	$4{,}186\ 10^{6}$	$1{,}327\ 10^{-10}$
1 BTU (British Thermal Unit)	$2{,}93\ 10^{-4}$	$1{,}055\ 10^{3}$	$3{,}343\ 10^{-14}$
1 Q (= 10^{18} BTU)	$2{,}93\ 10^{14}$	$1{,}055\ 10^{21}$	$3{,}343\ 10^{4}$
1 tec (tonne équivalent charbon*)	$7{,}2 - 8{,}6\ 10^{3}$	$2{,}6 - 3{,}1\ 10^{10}$	$8{,}16 - 9{,}81\ 10^{-7}$
1 tep (tonne équivalent pétrole*)	$10 - 12{,}6\ 10^{3}$	$3{,}6 - 4{,}6\ 10^{10}$	$1{,}1 - 1{,}44\ 10^{-6}$
1 teg (tonne équivalent gaz naturel*)	$9{,}3 - 12{,}9\ 10^{3}$	$3{,}3 - 4{,}6\ 10^{10}$	$1{,}06 - 1{,}47\ 10^{-6}$
1 Nm^3 (gaz naturel*)	$9 - 10{,}8$	$3{,}2 - 3{,}8\ 10^{7}$	$1{,}03 - 1{,}23\ 10^{-9}$
1 baril (pétrole= 159 litres*) (approximatif)	$1{,}68\ 10^{3}$	$6{,}1\ 10^{9}$	$1{,}9\ 10^{-7}$
1 t U^{235} (fissionné) (approx.*)	$2{,}63\ 10^{10}$	$9{,}5\ 10^{16}$	3
1 t U^{238} (fissionné) (approx.*)	$1{,}93\ 10^{10}$	$6{,}9\ 10^{16}$	2,2
1 t D (D-D, théorique*)	$9{,}38\ 10^{10}$	$3{,}38\ 10^{17}$	10,7
1 t Li^6 (D-T, théorique*)	$1\ 10^{11}$	$3{,}6\ 10^{17}$	11,4
1 t c^2 (masse→énergie)	$2{,}5\ 10^{13}$	$9{,}10^{19}$	$2{,}85\ 10^{3}$
1 MeV	$4{,}45\ 10^{-20}$	$1{,}602\ 10^{-13}$	$5{,}077\ 10^{-30}$
1 t TNT	$1{,}18\ 10^{6}$	$4{,}25\ 10^{12}$	$1{,}35\ 10^{-4}$

* Ces équivalences supposent une combustion parfaite et l'utilisation de l'énergie directement sous forme thermique. Seule une fraction de cette énergie est pratiquement convertible en énergie mécanique ou électrique (actuellement 30 à 40 % pour les combustibles fossiles et l'U^{235}).
** Une année moyenne = 8766 heures.

Fig. 3. — Conversion d'unités d'énergie en GW·an.

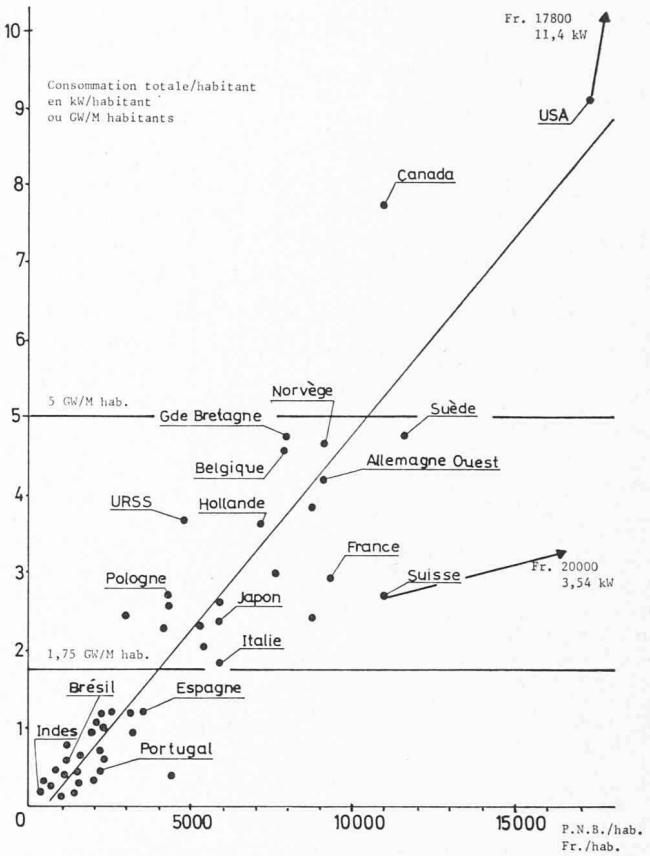

Fig. 4. — Puissance consommée en fonction du produit national brut en 1968 (position de la Suisse et des USA en 1973).

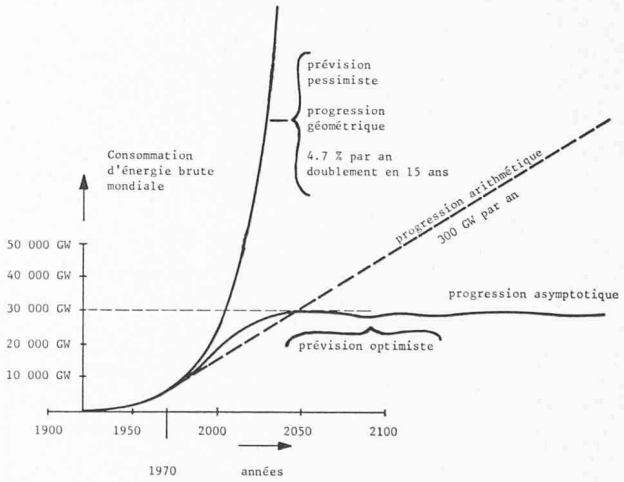

Fig. 5. — Evolutions extrêmes de la consommation mondiale d'énergie exprimée en puissance moyenne brute au cours du siècle prochain. Le chiffre de 30 000 GW a été admis par tous les conférenciers comme cadre raisonnable de discussion pour situer les sources d'énergies non conventionnelles dans un avenir qui concerne nos enfants.

La *figure 6* donne, à titre indicatif, une estimation (parmi d'autres) des réserves d'énergie dont dispose l'humanité. Chacun sait aujourd'hui que c'est apparemment le pétrole qui nous manquera en premier lieu. Les cent mille gigawatts-an qui nous restent seraient épuisés en l'an 2010 si on limitait la consommation du pétrole à sa valeur de 1970, soit à 2700 GW, mais beaucoup plus tôt si on laisse croître la consommation comme jusqu'ici. Peu importe la date, l'essentiel aujourd'hui est de se rendre compte qu'*à un moment donné, au cours du XXIe siècle, il ne faudra plus compter sur le pétrole pour couvrir nos besoins énergétiques*.

Remarquons en passant que la petite crise du pétrole qui a été imaginée, pour des raisons politiques, d'octobre 1973 à mars 1974 n'a rien à voir avec l'épuisement du pétrole qui nous attend au XXIe siècle. Par contre, elle a

			Monde	Europe occidentale	URSS	Europe EST sans URSS	Chine	USA	Canada	Amérique du Nord	Amérique du Sud	Proche Orient	Moyen-Orient Australie	Asie	Afrique	
Charbon	1)	TW·an	7000	5	56,3			19,5		7,9				8,9	1,4	
Pétrole			113	1,3		16,1		5,9	1,4		5,1	58,5	2,5		9,2	
Gaz			58	19,3		32,9		15,6	3,1		4,2	19,8	4		11,1	
U_3O_8	2)		2600	8,6				29,7	27,4						24,4	
Li nat	3)		22000 à 280000	répartition uniforme												
Deutérium	4)		>3,3 10^{11}					≈10								
Géothermique	5)	GW	13000													
Hydraulique	6)		< 3000													
Eolienne	6)		~ 100													
Marémotrice	6)		~ 64													
Houles	6)															
Energie therm. des mers	6)															
Bois	6)		~ 3000													
Solaire	6)		116.10^6													

Fig. 6. — Réserves (TW·an bruts) et flux naturels (GW bruts)* dans le monde.
Répartition géographique (% du combustible considéré).

* 1 TW·an = 1000 GW·an.

[1] « Minable coal » ≈ 50 % du charbon dans l'écorce terrestre (filons : profondeur < 2 km, épaisseur > 36 cm).

[2] A $ 10/lb (convertisseurs et surgénérateurs).

[3] Réserves prouvées à probables (réaction de fusion D-T).

[4] Réserves théoriques dans les océans (réaction de fusion D-D).

[5] Limite théorique du flux à travers les surfaces continentales.

[6] Puissances potentielles (pour le flux solaire, moyenne annuelle de l'énergie rayonnante du soleil atteignant la surface des terres et des mers, dont (24-30).10^6 GW frappent les continents).

Sources : Références du rapport LRP 63/73, EPF Lausanne, contenant 75 autres références et indications du professeur Weibel.

eu l'avantage de faire réfléchir et, maintenant que les passions se sont apaisées, trois lignes d'actions indispensables émergent :

1. Il faut *limiter la consommation* d'énergie par tous les moyens économiques, techniques et politiques raisonnables.
2. Il faut *mettre en valeur* toutes les formes d'énergie primaire conventionnelles *ou non*, dans les limites économiques compatibles.
3. Il faut *utiliser rationnellement* chaque forme d'énergie dans le domaine d'application où elle est la plus efficace et la moins nocive.

Nous avons ainsi situé l'optique à long terme dans laquelle se placent les conférenciers de ces deux journées d'information, soit au moment où le pétrole devra être remplacé par d'autres formes d'énergie primaire. *Chacun tentera d'évaluer la part de puissance que pourrait fournir la forme d'énergie non conventionnelle dont il nous parlera.*

Nous obtiendrons ainsi une idée concrète et chiffrée de ce que l'humanité pourrait tirer du vent, des marées, de la houle, de la chaleur des mers, de la chaleur terrestre, des surégénérateurs, de la fusion et du rayonnement solaire.

Il convient de mentionner deux formes d'énergie intermédiaires qui ne sont pas des sources d'énergie mais des moyens commodes de la transporter ou de l'accumuler et qui permettent de mettre à profit certaines formes d'énergie primaire sans cela inutilisables.

Il s'agit d'une part de l'*énergie électrique* par laquelle il convient de passer pour tirer profit des énergies hydrauliques et nucléaires. Nous n'en parlerons pas.

D'autre part, l'*hydrogène*, forme d'*énergie secondaire* encore non conventionnelle, pourrait résoudre certains problèmes de transport et de stockage. Dans le cadre de

Energie Primaire		Energie Intermédiaire		Energie Finale
Charbon	2190	Rejets thermiques		Industrie ?
Pétrole	2740	+ Pertes réseau	~800	
Gaz	1310	+ Consom. propre		
Bois	< 10	(centrales électriques)		Commerce ?
Tourbe	< 100			
Hydroélectrique	134			
Nucléaire	27	Electrique	~400	Résidence ?
Géothermique	~ 7,2	(centrales électriques)		
Marémotrice	~ 0,5			
Houle	0			Transport ?
Chaleur des mers	0			
Fusion	0	Non-électrique	~ 5200	
Surgénérateur	~ 0,4			
Solaire	?			
Humaine	≈ 40			

Fig. 7. — Transformation de l'énergie exploitée. — GW bruts.

— La contribution à la production d'électricité des centrales fonctionnant avec du combustible fossile est de 1200 GW bruts, sur la base d'un rendement moyen de 35 %.
— La puissance humaine est estimée à 10 W par personne en moyenne.

1970		Industrie	Commerce Résidence	Transport	Production Electricité et pertes	Total
USA	GW	770	515	595	620	2500
	%	30,8	20,6	23,9	24,7*	100
CEE (9 pays)	GW	382	370	144	inclues dans les autres secteurs	896
	%	42,6	41,3	16,1		100
Suisse	GW	5,4	9,1	4,5	inclues dans les autres secteurs	19
	%	28,5	47,8	23,7		100

Fig. 8. — Répartition selon les secteurs de consommation. — GW bruts et %.

* Dont 1/3 aboutit aux compteurs électriques.

Sources : USA, Suisse : LRP 63/73, Centre de Recherches en Physique des Plasmas, EPF-Lausanne, 1973.
CEE : Statistique des Communautés Européennes, Luxembourg, 1973.

nos deux journées, l'hydrogène présente un intérêt indirect, mais important.

Lorsqu'il ne sera plus possible de transporter l'énergie par oléoduc (une conduite de 1 m de diamètre peut transporter 40 GW bruts sous forme de pétrole), l'électricité et l'hydrogène devront prendre la relève.

Les *figures 7, 8 et 9* complètent la présentation de notre tableau énergétique mondial.

Soulignons l'importance des pertes de 800 GW (figure 7) par lesquelles on paie la transformation des énergies primaires en énergie électrique.

L'énergie hydraulique fait exception à cette règle :

— avec 1 GW de puissance *hydraulique* brute on peut obtenir aisément 0,8 GW de puissance électrique ou thermique dans les habitations ;

— avec 1 GW équivalent de *pétrole* on peut obtenir de 0,5 GW jusqu'à 0,8 GW de puissance thermique dans les maisons avec d'excellentes installations de chauffage ou seulement 0,33 GW de puissance électrique dans les maisons usuelles (c'est pourquoi les statistiques américaines valorisent artificiellement la production d'énergie hydro-électrique).

Techniquement, il semble possible de passer *apparemment sans pertes*

de un gigawatt sous forme électrique
à un gigawatt sous forme de vapeur à 500°C, puis
à un gigawatt sous forme d'eau chaude à 90°C et enfin
à un gigawatt sous forme d'air chaud à 25°C.

Transformée dans cet ordre, la puissance semble rester conservative au sens du premier principe de la thermodynamique, mais sa valeur se dégrade dans la mesure où la transformation inverse n'est plus possible. L'un des conférenciers propose une méthode pour tenir compte de cette dégradation qui modifie complètement les termes de comparaison des différentes formes d'énergie suivant l'usage qui en est fait ou qui peut en être fait.

Chaleur	Chauffage des locaux Préparation de l'eau chaude Procédés industriels à chaud	} ~ 50 % ~ 20 %
Travail mécanique	Industrie, Transport	~ 26 %
Procédés chimiques	Electrolyse et procédés directs (sans chaleur ni travail)	3,8 %
Lumière		0,2 %

Fig. 9. — Répartition selon les formes de consommation — Suisse 1972.

Source : Conférence de presse du 28.2.1974 par le conseiller fédéral W. Ritschard.

Adresses des auteurs :
Professeur J.-J. Morf
Ecole polytechnique fédérale
Département d'électricité
16, chemin de Bellerive
CH-1007 Lausanne

M. Roux
Office fédéral de l'économie énergétique
Kapellenstrasse 14
CH-3001 Berne

RÉSUMÉS DES CONFÉRENCES

TABLE DES MATIÈRES

1. Tableau énergétique mondial . . . . . J.-J. Morf et M. Roux
2. Energie éolienne . . . . . W. Schönball
3. Energie géothermique . . . . . P. Ceron
4. Energie des marées . . . . . R. Gibrat
5. Energie de la houle . . . . . R. Gibrat
6. Energie thermique des mers . . . . . R. Gibrat
7. Fusion thermonucléaire . . . . . E. S. Weibel
8. Surrégénérateurs . . . . . C. Zangger
9. Transformation d'énergie et hydrogène. R. W. Meier
10. Economie énergétique et exergie . . . . L. Borel
11. Réalisations en héliotechnique . . . . . E. A. Farber
12. Espoirs et limites de l'énergie solaire. . M. Touchais

1. Tableau énergétique mondial

J.-J. MORF et M. ROUX

En 1970, la consommation mondiale d'*énergie primaire* exprimée en puissance moyenne brute était située entre *6000 et 7000 gigawatts bruts*,

dont 41 % provenaient du pétrole,
36 % des charbons, lignites, tourbes et bois,
20 % du gaz naturel
et seulement
3 % des autres sources primaires telles que les énergies hydraulique, nucléaire, géothermique et marémotrice.

La consommation globale d'énergie a suivi depuis le début du siècle une progression géométrique en doublant tous les quinze ans environ. En admettant que l'on arrive à freiner cette croissance puis à la stopper par une politique mondiale d'économie et de restrictions, on peut adopter comme première hypothèse le chiffre raisonnable de *30 000 GW* pour le courant du XXIe siècle. D'autre part, on doit admettre que l'*épuisement du pétrole* aura vraisemblablement lieu au début du XXIe siècle.

C'est dans cette double hypothèse que les conférenciers suivants chercheront à montrer le rôle que pourraient jouer les sources d'énergie non conventionnelles telles que le vent, la chaleur terrestre, la chaleur des mers, les marées, la houle, les surgénérateurs, la fusion et l'énergie solaire.

L'utilisation de l'électricité, comme énergie secondaire ou intermédiaire, est appelée à un développement plus marqué que jusqu'ici et sera peut-être complétée par l'utilisation de l'hydrogène comme nouvelle forme d'énergie secondaire facilement stockable et transportable.

2. Energie éolienne : Réalisations, espoirs et limites

WALTER SCHÖNBALL

Le rotor à deux hélices tournant en sens opposés de l'éolienne NOAH, aménagée en 1973 sur une île allemande de la mer du Nord, a un diamètre de 11 m et l'alternateur triphasé de 70 kW, 380 V, entraîné directement par les pales, peut fournir annuellement une énergie jusqu'à 150 000 kWh (puissance moyenne de 17 kW).

Actuellement, les éoliennes pour production de courant électrique sont de trois types :

a) à axe horizontal et à 1 à 3 pales aérodynamiques tournant à une vitesse relativement élevée, maintenue constante par ajustage des pales.

b) à axe horizontal et 3 à 6 pales aérodynamiques, non ajustables, mais avec vitesse de rotation réglée électroniquement ou mécaniquement à l'optimum de la conception aérodynamique.

c) à axe vertical et anneau rotorique aérodynamique.

Les éoliennes peuvent être groupées et fournir de l'électricité, dans un réseau de distribution d'énergie décentralisé, notamment pour le chauffage. Au siècle passé, quelque 100 000 moulins à vent étaient installés en Europe. Equipées d'un rotor de 50 m de diamètre, ce nombre d'éoliennes modernes pourrait fournir une puissance annuelle moyenne de 23 GW.

La plus grande des éoliennes construite jusqu'ici est celle de Smith-Putnam, en 1941, d'un diamètre de rotor de 54 m et d'une

puissance installée de 1250 kW, au Vermont (USA). On propose maintenant des éoliennes d'un diamètre jusqu'à 130 m, correspondant à une surface circulaire de 10 000 m².

Les possibilités d'utilisation économique des éoliennes dépendent de leur prix compétitif. Actuellement, le prix est encore de plus de 2000 DM par kW installé. Les éoliennes ne deviendraient concurrentielles qu'à partir de 800 DM/kW. Toutefois, du fait de la situation générale de l'énergie, on peut s'attendre à ce que le prix d'autres sources d'énergie augmente considérablement, ce qui rendra de plus en plus intéressante l'énergie éolienne, gratuite et inépuisable.

Des accumulateurs intermédiaires sont nécessaires pour compenser les irrégularités du régime des vents. Ces accumulateurs peuvent être aménagés sous forme d'hydrogène (électrolyse de l'eau), de stations de pompage ou de volants. D'autres exemples d'applications sont les installations de dessalement d'eau de mer avec citernes d'eau douce, ainsi que des installations de chauffage avec accumulateurs d'eau chaude ou d'air chaud. Il serait en outre possible d'adapter les habitudes de consommation d'énergie à l'offre en énergie éolienne.

D'après l'état actuel de la technique, il devrait être possible de développer des installations d'énergie éolienne et des capacités d'accumulation qui pourraient apporter une contribution non négligeable à la solution du problème de l'énergie.

3. Energie géothermique

P. Ceron

La dizaine de champs géothermiques exploités dans le monde confirme la possibilité d'extraire la chaleur terrestre au moyen de forages (800-2500 m de profondeur) exécutés dans les zones où un certain nombre de conditions naturelles favorables - géologiques, géophysiques, hydro-géologiques - sont réunies pour créer une concentration de chaleur, c'est-à-dire un gisement de haute énergie.

En 1970, la puissance moyenne brute des fluides géothermiques exploités était de 7,75 GW, ainsi transformés : électricité (Italie 2,7 GW ; USA 0,60 GW ; Nouvelle-Zélande 1,80 GW ; Japon 0,40 GW), chauffage (Hongrie 0,60 GW ; Islande 0,60 GW), en cours de construction (Turquie 0,25 GW ; Amérique Centrale 0,80 GW), la puissance totale installée des centrales électriques était de 0,5 GW, la production électrique italienne de 2500 GWh/an, soit une puissance moyenne nette de 0,285 GW.

L'énergie géothermique étant pratiquement inépuisable, économique, peu polluante, mais non transportable, a trouvé dans la production d'électricité son utilisation la meilleure. La recherche de nouvelles ressources et l'exploitation des gisements à basse température encore inutilisés laissent prévoir en 1985 une puissance d'environ 18 GW bruts.

Pour le futur (XXIe siècle), l'éventuelle possibilité, liée à un récent programme de recherches en cours, de pouvoir exploiter les « roches sèches chaudes » profondes, fracturées artificiellement et les gisements « géopressurés », laisse prévoir des fourchettes de puissance très larges.

Aux USA, qui ont les plus grandes possibilités, les prévisions vont de 40 à 400 GW en puissance électrique installée.

Au Japon, on prévoit 50 GW qui représenteront le 15 % de la demande d'électricité, ou bien le 6 % de la demande japonaise totale d'énergie.

L'énergie géothermique fournit donc, à présent, un apport modeste au bilan énergétique mondial (0,1 %), tandis que les prévisions les plus optimistes arrivent à prévoir, pour le XXIe siècle, une valeur d'environ 5000 GW bruts.

4. Energie des marées

R. Gibrat

L'usine de la Rance, en marche depuis huit ans, a une fiabilité pratiquement parfaite. Les techniques et technologies des usines marémotrices sont donc maintenant parfaitement au point.

Mais la marée est un phénomène essentiellement de résonance. Sa captation est délicate ; car en construisant le barrage, on modifiera le régime même des marées. Cela apparaît évident quand on sait que l'action du soleil et de la lune sur le réservoir de la Rance est de moins d'un mégawatt, que l'énergie des marées dissipée à l'intérieur de ce même réservoir est de 60 MW et que l'Electricité de France en retire 240 MWe nets en pointe. Il faut faire venir l'énergie d'ailleurs...

Il est donc difficile dans les calculs à l'échelle mondiale de relier la puissance disponible pour l'homme à la puissance dissipée par la nature, celle-ci étant d'un ou plusieurs milliers de GW.

Il faut procéder cas par cas et le total des projets étudiés conduit à *64 GWe de puissance moyenne*, 180 GWe de puissance installée et 560 000 GWh/an, ce qui est peu devant les problèmes mondiaux.

Les taux d'intérêt élevés en cours dans le monde actuel handicapent fortement les usines marémotrices, mais leurs qualités exceptionnelles vis-à-vis de l'environnement les remettent à l'ordre du jour.

5. Energie de la houle

R. Gibrat

La houle résulte de la transformation de l'énergie du vent en trois énergies de nature différente : énergie potentielle des diverses parties du liquide portées à des niveaux différents de celui de l'équilibre, énergie cinétique des mêmes parties due aux mouvements cycliques ainsi créés, énergie capillaire enfin, due aux allongements correspondant aux surfaces liquides.

En simplifiant les formules correspondantes, on peut adopter pour la puissance par mètre de côte la formule sommaire

$$P = 0{,}95\,(2a)^2\,T$$

a = demi-amplitude de la houle, T = période.

Pour 1,80 m d'amplitude, ce qui dans certains lieux a une fréquence de 10 %, cela donne 31 kW/m que l'on peut songer à capter avec un rendement de 20 à 30 %. Au total 10 GWe peut-être pour 1000 km de côtes en France, 1000 GWe peut-être pour l'ensemble du monde.

Mais son caractère « sauvage » ne permettant pas de prévoir son arrivée, la nécessité de construire des ancrages résistant aux plus fortes tempêtes pour ne récupérer qu'une énergie faible, tout cela rend encore aujourd'hui peu probable une utilisation étendue de l'énergie de la houle.

6. Energie thermique des mers

R. Gibrat

De grands efforts ont été faits par le Français Georges Claude, de 1926 à 1940, pour préciser les problèmes posés par la captation de l'énergie thermique des mers. Ses échecs ont cependant mis en évidence les solutions possibles. Une société d'économie mixte « L'Energie des Mers », fondée en France en 1948, a exécuté de très importantes études et aurait probablement procédé à une réalisation de 15 MWe bruts à Abidjan (Côte-d'Ivoire) si des baisses spectaculaires de fuel n'étaient intervenues. Aujourd'hui, compte tenu des productions éventuelles d'eau douce et de la remontée des produits nutritifs par la prise de l'eau froide, il peut paraître intéressant de reprendre la question.

Quarante sites ont été recencés; à 15 MWe chacun, cela ne fait que 0,6 GWe. Par contre, la puissance disponible entre les 200 mètres supérieurs de l'océan et le fond (différence de température 10°C) correspond à 10^6 GW, ce qui est énorme.

7. Fusion thermonucléaire

E. S. Weibel

La production d'énergie industrielle par fusion thermonucléaire n'est pas encore réalisée. Selon les programmes des Etats-Unis, sa possibilité scientifique devrait être démontrée dans les années 1980 à 1985. La mise au point d'un réacteur DT de 5 GW(t) est attendue pour la fin de ce siècle.

Le réacteur DT utilisera comme combustible primaire le Lithium naturel (92,6 % Li^7, 7,4 % Li^6) dont le contenu énergétique est de 2,8 MW-an par kilo. Les réserves mondiales sûres de Lithium et récupérables à 100 fr/kg s'élèvent à $0{,}8 \cdot 10^{10}$ kg, les réserves probables au même prix à 10^{11} kg. Ces quantités correspondent à une réserve énergétique de $2{,}2 \cdot 10^7$ GW-an assurée et à $2{,}8 \cdot 10^8$ GW-an probable. Au taux d'utilisation de $3 \cdot 10^4$ GW, elle durera au moins 730 ans et probablement 9300 années. Le prix de l'énergie produite sera comparable aux prix actuels.

Le réacteur DT ne produit pas de déchets radioactifs. Il contient un inventaire de matières radioactives dont les temps de vie sont inférieurs à cinq ans. Cette activité est de 0,3 Ci/W(t). La protection radiologique de la biosphère pourra être assurée par les techniques connues actuellement. Elle sera beaucoup plus facile que celle nécessaire pour les réacteurs surrégénérateurs à fission.

Les problèmes non résolus les plus importants qui barrent à présent la réalisation d'un réacteur DT sont d'ordre physique et technologique. Les premiers concernent le chauffage du plasma à la température d'amorçage de la réaction, la réduction des pertes d'énergie. Les deuxièmes concernent la pureté du plasma, la durée de vie de la structure du réacteur et son entretien.

8. Réacteurs surrégénérateurs

C. Zangger

L'effort de développement dans le domaine des réacteurs surrégénérateurs a été essentiellement motivé par la nécessité d'assurer un approvisionnement énergétique économique et pratiquement illimité à l'humanité. Le réacteur rapide refroidi au sodium a reçu de très loin le plus large support par le fait qu'il complète fonctionnellement les réacteurs à eau légère actuels, basés comme lui sur le cycle uranium-plutonium.

Six prototypes expérimentaux de puissance respectable ont été mis en service déjà entre 1963 et 1974. Six grands pays industriels construisent ou projettent la construction de centrales de démonstration commerciale dont les mises en exploitation s'échelonneront entre 1975 et 1982. Les expériences réalisées et les perspectives économiques semblent telles que ces pays prévoient, dès le milieu des années 80, un programme d'installations de centrales surrégénératrices dont la puissance totale pourrait bien dépasser un millier de GWe en l'an 2000.

Grâce à la surrégénération, les réacteurs rapides permettent d'atteindre un taux de consommation de l'uranium brut situé entre 50 et 100 % (contre 1 à 2 % pour les réacteurs à eau légère). En outre, les frais de production de l'énergie électrique sont presque insensibles au prix du combustible. Ces deux propriétés offrent la possibilité d'exploiter des gisements à basse teneur d'uranium mais de très grande capacité, permettant de retirer une énergie pratiquement illimitée de l'ordre de la centaine de millions de TW-an. Le cycle thorium-uranium offre potentiellement les mêmes perspectives quantitatives que le cycle uranium-plutonium.

Selon les récentes études faites principalement aux Etats-Unis, il ne semble pas que les problèmes de protection de l'environnement et des limites écologiques soulèvent des questions essentielles nouvelles par rapport aux réacteurs de la génération actuelle. Des différences de degré existent toutefois — notamment en relation avec la quantité de plutonium produite — ce qui nécessitera un renforcement de certaines mesures de sécurité et de surveillance, concernant surtout le transport du plutonium et son abondance dans les déchets radioactifs.

9. Procédés non conventionnels de transformation d'énergie et Hydrogène, une nouvelle forme d'énergie secondaire

R. W. Meier

La transformation de l'énergie calorifique en forme électrique est accomplie dans les groupes turbo-alternateurs. Toute une gamme de procédés non conventionnels ont été proposés et développés pour réaliser une conversion directe d'une forme chimique ou calorifique en électricité. Parmi ces technologies le générateur magnéto-hydrodynamique et la pile à combustible sont discutés. Il ne paraît pas que la machine tournante classique sera remplacée par un procédé supérieur avant la fin de ce siècle. Toutefois, la pile à combustible pourrait gagner d'importance pour une transformation locale d'énergie à mesure que l'hydrogène sera introduit comme une source d'énergie secondaire.

L'hydrogène est une forme d'énergie avec des propriétés uniques pour le stockage, le transport, le recyclage et l'utilisation directe. Il se prête facilement à la conversion sous forme mécanique, calorifique ou électrique. L'importance que gagnera son emploi dépend fortement du rendement et des coûts d'investissement des systèmes de production. Les électrolyseurs actuels atteignent un rendement près de 70 %, mais une augmentation à 90 % paraît possible avec le développement d'une nouvelle technologie.

De même la production de l'hydrogène par dissociation chimique de l'eau comme une solution à long terme a été proposée. L'énergie thermique sera fournie par un réacteur nucléaire haute température à un niveau de 700-1000°C. Les coûts de transport de l'hydrogène par conduite de gaz offrent des avantages vis-à-vis des lignes haute tension à partir d'une distance de 300-400 km. Différentes technologies de stockage paraissent réalisables sous forme gazeuse, liquide ou solide.

10. Economie énergétique et exergie

L. Borel

Dans le contexte actuel de la pénurie d'énergie, il est essentiel de lutter contre le gaspillage de l'énergie. Cette action ne peut être efficace que si les installations sont correctement conçues et exploitées.

Dans cette perspective, il convient de mettre en œuvre un nouvel outil de travail, classé sous l'appellation générale « Méthode de l'exergie » (ou « Méthode de l'énergie utilisable »).

L'exergie-chaleur est le travail réversible équivalent à une énergie-chaleur. Elle dépend non seulement de cette énergie-chaleur, mais encore de la température à laquelle est livrée la chaleur, ainsi que de la température de l'atmosphère.

L'exergie-transformation est le travail réversible équivalent à une transformation thermodynamique. Elle dépend non seulement de l'état thermodynamique de la matière considérée, mais encore de la température de l'atmosphère.

La perte thermodynamique est la perte d'exergie résultant d'une dégradation de l'énergie, c'est-à-dire d'une irréversibilité (dissipation, transfert-chaleur sous chute de température, réactions chimiques, mélanges physiques, ...).

A l'aide des définitions précédentes, il est possible d'établir un *bilan d'exergie* pour un système quelconque, même s'il comporte des réactions chimiques, des réactions nucléaires, des accumulations ou des déperditions.

Enfin, la comptabilité de l'exergie donnée et de l'exergie reçue par un système permet de définir le *rendement exergétique* de ce système, quelle que soit sa complexité ou sa taille.

Cet outil de travail doit permettre d'une part de mieux optimaliser les installations et d'autre part de les exploiter de façon plus rationnelle. En effet, tout d'abord, il doit tendre à améliorer les vrais rendements en luttant contre les pertes énergétiques, dans la mesure où il permet de les localiser dans un complexe, quelle que soit l'échelle de ce dernier (machine, installation, entreprise, région, nation, ...). Ensuite, il doit conduire à une évaluation plus équitable des prestations concédées par les fournisseurs d'énergie à leurs clients.

11. Héliotechnique — réalisations et espoirs

E. A. Farber

L'énergie solaire peut être convertie dans pratiquement toutes les formes d'énergie que nous utilisons dans notre vie courante. Le « Solar Energy and Energy Conversion Laboratory » de Gainesville en Floride a développé des prototypes de tous genres :

Production d'eau chaude, chauffage complet d'une maison, chauffage de piscines, *réfrigération* par l'énergie solaire, distillation, cuisson, fours de fusion à haute température, production d'énergie mécanique et électrique.

Plusieurs méthodes de conversion et de stockage sont déjà rentables aujourd'hui. Elles économisent l'argent et l'énergie, par rapport aux méthodes usuelles.

L'épuisement des combustibles fossiles étant inéluctable, l'auteur estime que l'énergie solaire sera à échéance la seule source d'énergie inépuisable. Il ne voit aucun autre choix possible pour l'avenir de nos enfants.

12. Espoirs et limites de l'énergie solaire

M. Touchais et M. Perrot

Les auteurs remarquent que les erreurs les plus énormes se propagent dans les milieux scientifiques et techniques à propos de l'utilisation pratique de l'énergie solaire. Deux problèmes semblent préoccuper plus spécialement les énergéticiens : celui du stockage, celui du prix du kWh d'origine solaire.

Or le premier problème ne se pose, lorsqu'il se pose, que pour de très courtes périodes afin de régulariser les températures à leur valeur optimale. Il ne présente aucune difficulté technique. Dans le cas de l'utilisation d'une matière énergétique fabriquée à partir du rayonnement solaire, il ne se pose évidemment pas.

Le second, dans l'état actuel des choses, dû à la carence de l'action des pouvoirs publics, est *impossible* à résoudre. Le serait-il, qu'il ne serait d'aucune utilité, car l'énergie solaire, envisagée dans une production industrielle — et non pas comme support de « gadgets » solaires — est une énergie complémen-

taire des énergies traditionnelles. C'est donc la baisse du prix du kWh traditionnel qu'il faudrait établir.

L'auteur remarque ensuite que si l'on considère comme réserve de puissance la millième partie du flux d'énergie intercepté par le globe terrestre, afin d'être assuré d'aucune incidence désastreuse sur l'écologie et la climatologie, soit 108 000 GW, et que l'on applique un rendement moyen des convertisseurs d'environ 30 %, qu'il montre d'ailleurs devoir être très pessimiste, on aboutit aux 30 000 GW adoptés comme base de discussion au cours des présentes journées. Il en conclut que la détermination d'une limite de puissance est un problème sans objet à l'heure actuelle et aussi pour de nombreuses décennies encore.

La conséquence est qu'il faut développer d'urgence les applications véritablement industrielles de l'énergie solaire — le chauffage des maisons n'étant qu'un palliatif mineur et qui n'est applicable qu'à des habitations privilégiées par leur exposition. Toutes les techniques nécessaires sont connues et des plus banales. Pour ce faire, l'auteur propose un programme rationnel de développement en quatre phases.

Comme conclusion l'auteur pense que l'on peut répondre à la question posée par ces journées d'information : Tous les espoirs sont permis, les limites ne sont que celles de l'inconséquence humaine !

Essai de synthèse

par M. ROUX et J.-J. MORF

Les tableaux suivants donnent pour chaque source primaire d'énergie une fourchette de la puissance moyenne qu'elle pourrait fournir lorsque la consommation totale atteindra 30 000 GW et que, vraisemblablement, les réserves de pétrole et de gaz naturel seront épuisées.

Pour chaque source on a également indiqué les principales limites naturelles et les principaux obstacles géographiques, technologiques, économiques, financiers, écologiques, psychologiques et politiques qui devront probablement être affrontés et au besoin contournés.

Il ressort, en conclusion, que l'humanité disposera de suffisamment d'énergie primaire, mais que l'effort d'adaptation nécessaire sera plus important que par le passé.

Quoique les observations de tous les conférenciers des deux journées d'information aient été prises en considération, les tableaux de synthèse n'engagent que leurs deux auteurs.

Conclusion

Même si le pétrole et le gaz naturel viennent un jour à manquer, l'humanité disposera de suffisamment d'autres sources d'énergie primaire pour satisfaire ses besoins énergétiques.

La mise en valeur de ces sources dépendra en partie des possibilités de transport et de stockage offertes par l'*hydrogène* et de leur utilisation rationnelle dans l'optique d'un *bilan exergétique* sainement conçu.

21E SIÈCLE PUISS. MOY. ENVISAGEABLE	PÉTROLE ET GAZ NATUREL 0 À (? 10 000 GW ?)
LIMITES NATURELLES	GISEMENTS ÉPUISÉS AU DÉBUT DU 21E SIÈCLE. (? SAUF SI DÉCOUVERTES IMPRÉVUES ?)
OBSTACLES GÉOGRAPHIQUES	GISEMENTS ESSENTIELLEMENT AU PROCHE ORIENT ET PAYS COMMUNISTES. (? MER DU NORD ? GAZ D'EUROPE ?)
OBSTACLES TECHNOLOGIQUES	EXTRACTION : ACTUELLEMENT ENCORE FACILE, MAIS DE PLUS EN PLUS DIFFICILE AU FUR ET À MESURE DE L'ÉPUISEMENT. UTILISATION : AUCUN OBSTACLE, CAR LA PLUS COMMODE, DIRECTE APRÈS RAFFINAGE.
OBSTACLES ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS	ACTUELLEMENT BON MARCHÉ, MAIS DE PLUS EN PLUS ONÉREUX AVEC LA RARÉFACTION.
OBSTACLES ÉCOLOGIQUES	POLLUTION DE L'ATMOSPHÈRE : CO_2 ↗ SO_2 ↗ NO_X ↗ O_2 ↘
OBSTACLES PSYCHOLOGIQUES	INSÉCURITÉ DE L'APPROVISIONNEMENT.
OBSTACLES POLITIQUES	DÉPENDANCE DE L'EUROPE VIS-A-VIS DES PAYS POSSESSEURS DE GISEMENTS.

21E SIECLE PUISS. MOY. ENVISAGEABLE	CHARBON 2 000 GW À 20 000 GW (VOIR OBSTACLES ÉCOLOGIQUES)
LIMITES NATURELLES	7 000 000 GW-AN (= 3 500 ANS À 350 ANS SUIVANT PUISSANCE ENVISAGEABLE) (ÉPUISEMENT O_2 AVANT ÉPUISEMENT CHARBON ?)
OBSTACLES GÉOGRAPHIQUES	GISEMENTS ESSENTIELLEMENT EN ASIE 65 % (URSS) AM. NORD 28 % (USA) EUROPE SEULEMENT 5 %
OBSTACLES TECHNOLOGIQUES	EXTRACTION PÉNIBLE À PROFONDEUR CROISSANTE. TRANSPORT ET MANIPULATION PEU PRATIQUES ET MALPROPRES. MAIS UTILISATION DIRECTE APRÈS TRI. OBSTACLES CONTOURNABLES PAR GAZÉIFICATION OU LIQUÉFACTION ARTIFICIELLE OU PASSAGE PAR H_2
OBSTACLES ÉCONOMIQUES ET FINANCIERS	COÛT DE L'EXTRACTION CROISSANT. COÛT DE LA TRANSFORMATION ÉLEVÉ.
OBSTACLES ÉCOLOGIQUES	POLLUTION DE L'ATMOSPHÈRE : CO_2 ↗ SO_2 ↗ O_2 ↘ EXTRACTION À CIEL OUVERT.
OBSTACLES PSYCHOLOGIQUES	CONDITIONS DE TRAVAIL.
OBSTACLES POLITIQUES	L'EUROPE DÉPENDRAIT BEAUCOUP DES PAYS PRODUCTEURS. GRÈVES ?