Place de l'hydroélectricité dans le bilan énergétique mondial

Share of hydro-electric power in the world energy balance

J. Cotillon

Secrétaire Général
Commission Internationale des Grands Barrages
Contrôleur Général adjt.
Direction de l'Équipement – Electricité de France

Introduction

Quelle est la place actuelle de l'énergie hydraulique parmi les autres énergies ? Quel est son avenir, sa place dans le bilan énergétique mondial de l'an 2000 par exemple ?

1. C'est une énergie renouvelable et cela renseigne déjà sur ses possibilités : comme la plupart de ces énergies, elle est liée aux éléments non transportables d'un site, doit être produite sur place, son transport ne pouvant s'effectuer alors que sous forme d'électricité. L'énergie hydraulique trouve donc l'essentiel de ses applications dans l'électricité.

Les énergies non-renouvelables au contraire sont disponibles sous forme de gisements solides, liquides ou gazeux : leur matière première est plus facilement transportable et concentrable que l'électricité (*l'Australie peut envoyer en Europe son charbon mais pas son hydroélectricité*) ; elle trouve de larges utilisations en dehors de l'énergie électrique (*en 1978, 10 % seulement de la production du pétrole-gaz (1) et 43 % de celle du charbon [1] ont été utilisés à la fourniture d'électricité*) ; leur transformation en courant électrique néces-

site des investissements plus légers que pour les énergies renouvelables.

Le développement industriel des XIX^e et XX^e siècles s'est donc effectué d'abord par les énergies non-renouvelables : le charbon, grâce à la machine à vapeur, a ouvert la voie bien avant l'apparition de l'électricité.

Actuellement, et sans doute pour longtemps, les énergies non-renouvelables sont les grands de l'énergie : *en 1978, pétrole, gaz et charbon représentaient respectivement 43, 19 et 30 % (total 92 %) de la production d'énergie [1]*.

L'énergie hydraulique, première actuellement des petits, doit son envol à l'électricité et c'est dans ce domaine que son importance est à apprécier plutôt que dans celui plus vaste de la production d'énergie où de larges secteurs lui sont fermés. C'est dans les seconds rôles qu'il faut chercher sa place, où elle remporte Oscars et César.

2. Mais cette appréciation n'est vraie qu'en moyenne ; dans certains pays, l'hydraulique joue un rôle de premier plan. Ainsi pour vingt d'entre eux, la part de l'hydraulique dans l'électricité (H/E) est supérieure à 50 % (Tableaux III et IV).

Et il ne s'agit pas que de petits pays (Ghana, Zambie, Zaïre, Mozambique, Zimbabwe, Egypte, Pérou, Colombie, Chili, Vénézuéla, Nouvelle-Zélande, Corée du Nord) ; il s'en trouve de très grands (Brésil, Canada) et beaucoup en Europe (Norvège, Portugal, Suisse, Autriche, Suède, Yougoslavie).

3. On ne peut pas traiter de la place de l'hydraulique du seul point de vue quantitatif.

Une usine nucléaire fait penser aux merveilles de la science, aux progrès de la technique alors qu'une usine

(1) Chiffre calculé comme suit :

– gaz naturel et pétrole en 1978 = 6 400 Mtep (2) × 62 % = 3 970 Mtep [1].

– quantité d'électricité produite à partir du gaz et du pétrole : 7 617 TWh – [1 660 (H) + 531 (N) + 3 766 (C)] = 1 660 TWh [2] = 370 Mtep soit 9,3 % de 3 970 Mtep.

Le chiffre indiqué en [2] page 275 pour l'hydroélectricité a été porté de 1 557 à 1 660 TWh pour tenir compte d'une erreur possible sur le chiffre de production des USA. C'est par pure coïncidence que l'on a le même chiffre pour l'hydraulique (H) que pour le pétrole + gaz (P + G).

hydroélectrique exprime la victoire de l'homme sur la nature : c'est l'exaltation de sa puissance, l'évocation d'un Prométhée délivré de ses liens. Ainsi, il y a une ou deux décennies seulement, les usines hydroélectriques des pays développés étaient moins des bâtiments industriels que des temples célébrant par leur architecture et leurs fresques victoire et délivrance, avec parfois des anges dans le ciel bleu du plafond (usine souterraine de Soverzerne, Piave, Italie). Pour les pionniers de l'époque de sa construction, Bratsk fut le symbole de la puissance russe, la vitrine de la Sibérie soviétique, une Jérusalem nouvelle chantée par le poète Evtouchenko. Au Québec "La Manic" est passée dans la légende, et à propos des travaux de la Baie James (Canada) et de l'Amazonie (Brésil) on parle de frontière reculée, de nouvelle frontière.

Ce culte se retrouve maintenant dans les pays en voie de développement (fresques aux usines de Moxoto et Paulo Afonso IV sur le rio San Francisco au Brésil).

Dans les zones habitées, dompter un fleuve assure le développement économique de toute une région : par delà la notion d'aménagements à buts multiples c'est le développement intégré d'une zone qui est visé. Faut-il rappeler l'exemple si souvent cité de la Tennessee

Valley Authority et d'autres moins connus comme le North of Scotland Hydro-Electric Board (NSHEB), créé en 1943, pour produire de l'électricité mais aussi pour assurer le développement économique et social de l'Ecosse (développement de la pêche, du tourisme, formation de tailleurs de pierre, construction de routes, de maisons. . .).

Est-ce trop dire que cette énergie hydraulique plus qu'une autre est l'objet d'un culte et relève du sacré ? Mais qu'on ne s'y trompe pas : c'est la victoire de l'homme sur lui-même qu'elle célèbre.

Situation actuelle

Potentiel équipable

Le potentiel équipable est estimé à 9 800 TWh : c'est l'équivalent de la production mondiale d'énergie en 1955 ou de ce que sera la production mondiale d'électricité en 1983.

C'est aussi 27 % du potentiel sauvage estimé à 36 000 TWh (Tableau I) et même 33 % si l'on considère le chiffre de 12 000 TWh mentionné au chapitre : "Les facteurs d'incertitude".

Tableau I. — Potentiel sauvage et potentiel équipable dans le monde par zones géographiques [4].

Zones géographiques	Superficie 10 ⁶ km ²	Potentiel (3) sauvage (TWh)	Potentiel équipable			
			(GW) (4)	(TWh) (4)	par km ²	
					(MWh/km ²)	rapport à la moyenne
Europe (sans l'URSS)	4 866	3 400	215	700	140	2
URSS	22 272	4 000	269	1 100	50	0,7
Etats-Unis Canada, Groenland	21 498	6 100	200	1 300	60	0,85
Japon, Chine	10 370	9 000	380	1 450	140	2
Amérique Centrale Amérique du Sud	20 500	5 400	328	1 850	90	1,3
Afrique	30 300	6 300	437	2 000	66	0,94
Asie sans le Japon la Chine et la Sibérie	20 865	?	309	1 200	58	0,83
Océanie	8 521	1 500	38	200	22,5	0,32
Antarctique	14 000	200	—	—	—	—
Total arrondi sans l'Antarctique	140 000	36 000	2 266	9 800	70	

(3) Certains de ces chiffres peuvent être retrouvés au Tableau VI.4, page 171 du volume "Enquête sur les ressources énergétiques — 1974" (CME) [4] mais certaines données de ce Tableau sont erronées : par exemple pour les Etats-Unis c'est le potentiel équipable et non le potentiel sauvage qui est mentionné.

(4) On peut retrouver ces chiffres dans "Enquête sur les ressources énergétiques 1974" (CME) [4], pages 187 et suivantes et page 173 (Tableau VI.7) [4].

Tableau II. — Pays ayant le plus fort potentiel hydro-électrique équipable [4].

Pays	TWh
1 — Chine	1 320
2 — URSS	1 095
3 — USA	701,5
4 — Zaïre	660
5 — Canada	535,2
6 — Brésil	519,3
7 — Madagascar	320
8 — Colombie	300
9 — Inde	280
10 — Burma	225
11 — Vietnam et Laos	192
12 — Argentine	191
13 — Indonésie	150
14 — Japon	130
15 — Equateur	126
16 — Nouvelle Guinée	121,7
17 — Norvège	121
18 — Cameroun	114,8
19 — Pérou	109,2
20 — Pakistan	105
21 — Suède	100,3
22 — Mexique	99,4
23 — Vénézuéla	98
24 — Chili	88,6
25 — Gabon	87,6
26 — Espagne	67,5
27 — France	65
28 — Yougoslavie	63,6
	7 986,7
	(81,5 %)
Autres pays	1 815,7
	(18,5 %)
Total	9 802,4

Ces chiffres sont extraits de la dernière publication de la Conférence Mondiale de l'Energie (CME) sur ce sujet [4]. Des documents ultérieurs de la CME ont repris ces chiffres [5], parfois avec des erreurs [6]. Certaines publications citent des chiffres largement divergents parfois dans le même ouvrage [7].

La diversité des présentations et des unités employées peuvent expliquer ces chiffres contradictoires. Le potentiel équipable est en effet exprimé :

- tantôt en énergie annuelle (en TWh ou en TJ ou en Gtep) :

— 9 800 TWh; ($1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh} = 10^9 \text{ kWh}$);
 — 35 921 000 TJ ($1 \text{ TWh} = 3 600 \text{ TJ}$);
 — 2.2 Gtep ($1 \text{ Gtep} = 4 500 \text{ TWh}$);

- tantôt en puissance

— 2 200 GW ou 2.2 TW avec une durée d'utilisation de cette puissance de 4 380 h ($8 760/2$) soit avec un coefficient d'utilisation de 0,5 ;

- en puissance annuelle moyenne équivalente (en MW) c'est-à-dire la productibilité divisée par 8 760 h, celle-ci pouvant être la productibilité annuelle *moyenne* ou la productibilité *garantie* (firm energy) (5).

Les facteurs d'incertitude

Le potentiel équipable n'est pas une donnée certaine. Son estimation est variable car entachée d'incertitudes qui ont théoriquement trait, pour chaque pays ;

- au contexte économique (coût des autres énergies, taux d'actualisation) ;
- à l'environnement social (acceptation ou refus des submersions, des détournements de rivières),
- à la volonté politique de mise en œuvre de l'hydro-électricité
- et à la possibilité d'aménagements à buts multiples.

En pratique la fiabilité du potentiel dépend des moyens mis en œuvre pour l'estimer.

Ainsi en France, pendant ces dernières trente années, les estimations ont varié entre 60 et 80 TWh ; l'estimation actuelle est de 72 TWh, dont 66 TWh (92 %) en service et en construction au 1^{er} janvier 1982.

Pour les plus grands pays en voie de développement, l'incertitude est plus grande encore : par exemple, les estimations viennent de passer de 1 300 à 1 900 TWh pour la Chine et de 500 à 800 TWh pour le Brésil.

En général, elles sont corrigées en hausse quand le seul point de vue économique est en jeu ; les contraintes écologiques pourraient provoquer une légère réduction. A 9 800 TWh, le potentiel hydroélectrique serait plutôt sous-estimé : 12 000 TWh serait un chiffre plus probable. Dans ce qui suit, on conservera néanmoins pour le Brésil, la Chine, la France, les chiffres cités dans l'Enquête de la CME qui a été publiée en 1974 [4].

Sa distribution dans le monde

La répartition par zones géographiques est donnée au Tableau I.

Elle n'est pas proportionnelle à la surface, car le relief et la pluviométrie introduisent des différences. A l'intérieur de chacune des grandes zones, la distribution n'est pas plus uniforme.

A ce titre, l'Afrique est un cas extrême : son potentiel (2 000 TWh) est concentré sur la bordure orientale montagneuse et la zone équatoriale ; de plus, la moitié intéresse deux pays seulement, Zaïre (660 TWh) et Madagascar (320 TWh) (6) et de surcroît, au Zaïre, la moitié (300 TWh) se retrouve en un seul site, Inga.

Malgré ces inégalités *l'énergie hydraulique est mieux répartie dans le monde que le charbon, le pétrole, le gaz et même l'uranium.*

Le Tableau II donne la liste des pays ayant le plus fort potentiel équitable.

(5) Voir à ce sujet le Tableau introductif sur le potentiel du Brésil donné plus loin dans ce numéro de la Houille Blanche par C.A. Amarante dans son article sur le Parana.

(6) Madagascar — 587 041 km² : le potentiel équipable est, au km², 4 fois celui de la France, la moitié de celui de la Suisse.

Potentiel équipé en 1978 (7)

Dans le monde

En 1978, la part équipée du potentiel était de l'ordre de 1660 TWh soit 370 Mtep, en assimilant la productivité à la production de cette année-là.

Elle représentait 17 % du potentiel équipable (9 800 TWh) et 21,7 % de la production d'électricité (7 617 TWh).

La figure 1 montre les parts respectives des quatre grandes sources primaires d'électricité : la contribution de l'hydraulique est égale pour 1978, à celles réunies du pétrole et du gaz. Cette appréciation est plus significative du rôle de l'hydraulique que de celle donnant seulement la part de l'hydraulique dans la production d'énergie (5,5 %) (8).

On peut également noter que l'hydraulique a représenté 19 % de la production charbonnière et que les 7 617 TWh d'électricité auraient pu être obtenus par 87 % de la production charbonnière de cette année-là.

Les Tableaux III et IV donnent la liste des principaux pays producteurs d'hydroélectricité. Deux points sont à souligner :

- pour vingt pays, la part de l'hydraulique dans l'électricité est supérieure à 50 % ;
- 15 seulement des 28 premiers pays pour le potentiel équipable (Tableau II) figurent parmi les 24 pays qui fournissent 90 % du potentiel équipé : *La mise en valeur des ressources hydrauliques d'un pays n'est pas fonction de leur importance mais du degré de développement du pays.*

La grande artère hydroélectrique est actuellement la Columbia (77.6 TWh en 1981 pour 18 535 MW installés) suivie par le St Laurent (52 TWh en 3 usines). La Grande (phase 1) prendra bientôt la 3^e place avec 62 TWh, mais le Parana, après la mise en service d'Itaipu (70 TWh pour 12 700 MW de puissance installée) viendra en tête en 1988 avec 108 TWh (20 TWh sont actuellement en service à Ilha Solteira et Jupia et 88 en construction dont 70 à Itaipu). Encore ne s'agit-il que du Parana à l'aval du confluent Paranaíba-Grande où il prend le nom de Parana (50 TWh sont en service à l'amont).

En France

Au 1^{er} janvier 1982, l'équipement du potentiel se présentait comme suit :

— équipé	64.3 TWh
— en construction	1.9 TWh
— en projet	
grand équipement	3.8 TWh
petites usines (< 5 MW)	2.0 TWh
	<hr/>
	72.0 TWh (16 Mtep)

(7) Chiffres de production (et non de productivité) pour l'année 1978 — tirés de [2].

(8) En 1978, la production d'électricité a représenté 25,6 % de la production d'énergie ; la part de l'hydraulique dans l'énergie a donc été de $21,7 \% \times 25,6 \% = 5,5 \%$.

Figure 1 — Consommation d'électricité en 1978 dans le monde, en 1980 en France.

En 1981, la part équipée (64.3 TWh) a représenté 89.3 % du potentiel équipable et 27,4 % de la production d'électricité (264 TWh).

En 1980, la figure 1 montre la situation tout à fait remarquable des parts respectives des quatre grandes sources primaires d'électricité : leur contribution est sensiblement d'un quart pour chacune d'elles.

En 1981, la poussée du nucléaire se fait au détriment du pétrole-gaz, mais laisse intacte la part de l'hydraulique dans la consommation (Tableau V).

Pendant les dix dernières années, le rapport H/E a évolué comme indique dans le Tableau VI dans lequel :

- la 1^{ère} ligne correspondant pour H à la production,
- la 2^e ligne à la productivité en année d'hydraulicité moyenne ;
- le coefficient d'hydraulicité est donné en 3^e ligne : la bonne hydraulicité depuis cinq ans masque la réduction de la place de l'hydraulique dans le parc de nos moyens de production.

En France, en 1980, compte tenu de la régression du charbon, l'hydroélectricité (15.5 Mtep) est la première des *énergies primaires nationales* devant le charbon (15.1 Mtep) [8], le pétrole et le gaz (9.2 Mtep) [8] puis le nucléaire (6.4 Mtep) (9). Il en a été de même en 1981, mais en 1982, charbon et nucléaire devanceront l'hydroélectricité.

Répartition mondiale

Du point de vue du développement économique, on peut distinguer actuellement trois groupes de pays :

(9) En comptant le nucléaire pour moitié (minerai métropolitain). L'ensemble du nucléaire est souvent compté comme une source primaire nationale, l'autre moitié du minerai provenant de zones considérées stratégiquement sûres.

— les pays développés, c'est-à-dire les 24 pays de l'OCDE : leur hydroélectricité a été mise en œuvre au même titre que leurs autres ressources énergétiques
— cinq pays (URSS, Inde, Brésil, Mexique, Yougoslavie) très largement en tête des pays en voie de développement : leur équipement hydroélectrique est avancé, mais moins que dans les pays précédents

— les autres pays dont le développement ne fait que commencer : leur potentiel équipable (55 % du potentiel mondial) y est quasi intact (4 % est équipé)

Les caractéristiques de ces trois groupes sont données au Tableau VII qui montre à l'évidence le lien étroit qui existe entre développement économique, production d'électricité et équipement du potentiel hydroélec-

Tableau III. — Part de l'hydraulique dans la production d'électricité en 1978, pour les principaux pays producteurs d'hydroélectricité. Par ordre décroissant de production d'hydroélectricité [2].

Pays	Hydroélectricité H (TWh)	Electricité totale E (TWh)	H/E %
1 — USA	306	2 328	13,1
2 — Canada	230	327	70,3
3 — URSS	159	1 190,5	13,3
4 — Brésil	103	110,6	93,1
5 — Norvège	78	78,6	99,2
6 — Japon	76	565	13,4
7 — France	73	218,2	33,4
8 — Chine	67	225	29,8
9 — Italie	53	173,4	30,6
10 — Suède	53	89	59,5
11 — Espagne	44	100,3	43,9
12 — Inde	39	107	36,4
13 — Suisse	32	43,5	73,6
14 — Autriche	25	38,2	65,4
15 — Yougoslavie	25	50,5	49,5
16 — Mexique	21	53,6	39,2
17 — Corée du Nord	19,5	32	60,9
18 — Allemagne Fédérale	19	352,1	5,4
19 — Nouvelle-Zélande	17	21,6	78,7
20 — Australie	15	86	17,4
21 — Finlande	13	33,4	38,9
22 — Vénézuéla	12,75	24,3	52,5
23 — Colombie	10,5	15,5	67,7
24 — Portugal	10	13,1	76,3
25 — Egypte	9,2	13,5	68,1
26 — Turquie	9,2	21,2	43,4
27 — Roumanie	8,9	61,6	14,4
28 — Zambie	8,5	8,7	97,7
29 — Mozambique	6,75	7,2	93,8
30 — Chili	6,7	10,2	65,7
31 — Pérou	6,35	8,9	71,3
32 — Argentine	6	34	17,6
33 — Royaume-Uni	5,5	288,9	1,9
34 — Philippines	5,2	17	30,6
35 — Pakistan	4,9	11	44,5
36 — Tchécoslovaquie	4,4	68,9	6,4
37 — Ghana	4,25	4,3	98,8
38 — Iran	4	18,5	21,6
39 — Zaïre	4	4,1	97,6
40 — Zimbabwe	3,5	3,9	89,7
41 — Bulgarie	3,5	29,7	11,8
	1 601,60	6 887,90	23,2
	96,5 % de 1 658 TWh	90 % de 7 617 TWh	

Tableau IV. — Part de l'hydraulique dans la production d'électricité en 1978, pour les principaux pays producteurs d'hydroélectricité. Par ordre décroissant de H/E [2]

Pays	H/E %
Norvège	99,2
Ghana	98,8
Zambie	97,7
Zaïre	97,6
Mozambique	93,8
Brésil	93,1
Zimbabwe	89,7
Nouvelle-Zélande	78,7
Portugal	76,3
Suisse	73,6
Pérou	71,3
Canada	70,3
Egypte	68,1
Colombie	67,7
Chili	65,7
Autriche	65,4
Corée du Nord	60,9
Suède	59,5
Vénézuéla	52,5
Yougoslavie	49,5
Pakistan	44,5
Espagne	43,9
Turquie	43,4
Mexique	39,2
Finlande	38,9
Inde	36,4
France	33,4
Italie	30,6
Philippines	30,6
Chine	29,8
Iran	21,6
Argentine	17,6
Australie	17,4
Roumanie	14,4
Japon	13,4
URSS	13,3
USA	13,1
Bulgarie	11,8
Tchécoslovaquie	6,4
Allemagne Fédérale	5,4
Royaume-Uni	1,9

Tableau V — Parts respectives des quatre grandes sources primaires d'électricité en France

Electricité d'origine	1980	1981
Hydraulique	27,65 %	28 %
Nucléaire	23,3 %	38,5 %
Pétrole + Gaz	23,95 %	13,4 %
Charbon	23,9 %	22,2 %
	98,8 %	102,1 %
Importations	+ 1,2 TWh	
Exportations		— 2,1 %
Production	245 TWh	264 TWh
Consommation	248 "	258 "

trique : sur les 17 % équipés du potentiel, 11,5 % se trouvent dans les pays de l'OCDE soit les 2/3.

Le détail pour les pays de l'OCDE est donné au Tableau VIII.

Perspectives d'avenir

Modifications attendues dans la répartition du potentiel équipé

Le développement de l'hydroélectricité n'est pas conditionné par la concurrence du charbon ou du nucléaire. Là où existe un potentiel équipable, économiquement et écologiquement parlant, sa mise en valeur va de pair avec le développement économique du pays : les besoins en capitaux sont le frein commun.

Il faut donc s'attendre à trouver dans 20 ans, en l'an 2000, quatre groupes de pays représentatifs de quatre stades d'équipement du potentiel hydraulique, comme indiqué au Tableau IX.

On arriverait ainsi, en l'an 2000, à un maximum équipé de 3 500 TWh représentant 35 % du potentiel équipable, soit un doublement en 22 ans, ce qui correspond à un taux d'accroissement moyen de 3,5 %. Cet équipement représenterait aussi 15 % de la production d'électricité et 6,5 % de la production d'énergie.

La résistance des écologistes pourrait réduire le montant du potentiel équipable par le gel (momentané ?) de certains sites —en Suède par exemple, 16 TWh sur quatre grandes rivières sont exclus, de par la loi, de toute

Tableau VI

Années	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
H/E % en production	27,2	31,7	33,5	24	37,6	31,5	29	28,3	27,4
H/E % en productibilité	33	32,5	33	31	30	29	27	26	24
Coefficient d'hydraulicité	0,85	0,99	1,01	0,83	1,28	1,02	1,13	1,12	1,15

Tableau VII. — Répartition mondiale du potentiel équipé en 1978 [2].

	Population en 1977 M hab.	Potentiel équippable TWh	Potentiel équipé			Electricité TWh	Hydro- électricité %
			TWh	% du potentiel équippable	% du potentiel mondial		
1) OCDE	750	2 100	1 063	50 %	10,95 %	4 946	21,4 %
2) URSS — Inde Mexique— Brésil Yougoslavie	1 100	2 100	348	16,5 %	3,55 %	1 530	22,6 %
3) Autres pays (dont la Chine)	2 250	5 600	253	3,7 %	2,50 %	1 231	16 %
	4 100	9 800	1 664		17 %	7 617	21,7 %

Tableau VIII. — L'hydroélectricité dans les pays de l'OCDE. Potentiel et production en 1978 en TWh [2].

Pays	Potentiel équippable	Production en 1978
1 — USA	701,5	304
2 — Canada	535,2	229,8
3 — Australie	24,5	14,5
4 — Nouvelle-Zélande	55,2	16,6
5 — Japon	130	75,8
6 — Allemagne	21,8	19
7 — Autriche	43,9	25,1
8 — Belgique	0,5	0,5
9 — Danemark	—	0,02
10 — Espagne	67,5	43,6
11 — Finlande	18	13,4
12 — France	65	73,4
13 — Grèce	15,6	1,93
14 — Irlande	0,9	1,05
15 — Islande	35	2,63
16 — Italie	50,6	52,7
17 — Luxembourg	—	0,3
18 — Norvège	121	78,35
19 — Pays-Bas	—	—
20 — Portugal	17,8	9,56
21 — Royaume-Uni	4,2	5,5
22 — Suède	100,3	52,7
23 — Suisse	32	34
24 — Turquie	65,3	9,2
	2 105,8	1 063,6

utilisation— ; mais elle ne devrait pas modifier sensiblement ce scénario, basé sur un taux de développement de 3 % pour l'économie et de 2,5 % pour l'énergie.

Illustrons cet effort par l'exemple d'un petit pays européen, le Portugal. A fin 1981 il reste à équiper 40 % du potentiel en énergie et 60 % en puissance ; 20 à 23 barrages pourraient être construits d'ici 2010.

Transport

Les longues distances constitueront-elles un frein au développement de l'hydroélectricité, c'est-à-dire à l'équipement de chutes fort éloignées des centres de consommation ?

Il semble qu'il n'en sera rien : les grandes distances auxquelles on est confronté actuellement sont de l'ordre de 800 à 1 500 km et l'on ne devrait pas avoir à envisager, dans l'avenir, des distances supérieures à 3 000 km ; de plus une solution économique en courant continu à haute tension plutôt qu'en courant alternatif triphasé est en train de s'imposer grâce aux progrès de l'électronique par la mise au point de thyristors de grande puissance [9] [10]. Un projet est à l'étude avec cette technique pour transporter sur 2 400 km, de Sibérie Centrale à Moscou, 6 000 MW sous ± 750 kV. Citons parmi ceux en construction : la liaison Itaipu-Sao Paulo au Brésil (800 km — 6 300 MW) et parmi ceux en service, celle de Cabora Bassa-Apollo (1 414 km — 1 440 MW) entre le Mozambique et l'Afrique du Sud.

Pour fixer les idées, le coût du transport est de l'ordre de 2 centimes pour les convertisseurs d'extrémité, auxquels il faut ajouter 2 centimes par tranche de 1 000 km soit environ 8 centimes pour 3 000 km, pour une énergie de base. Au Canada, pour 1 400 km de ligne, le transport en courant alternatif de l'énergie des usines de la Baie James jusqu'à Montréal majore le prix de revient de kWh de 50 %.

Microcentrales [11]

Pour résoudre la crise énergétique, elles font parfois figure de panacée auprès des non-initiés. Or leur appoint est et restera très marginal par rapport à la contribution de l'hydraulique, elle-même relativement limitée.

En France, ces installations sont particulièrement nombreuses : à fin 1979, il y avait en service 1 170 usines de puissance installée inférieure à 5 000 kW (11), dont 217 exploitées par EDF, produisant 3,5 TWh contre 2,8 TWh en 1964 ; il n'est pas exclu d'arriver à un total de 5,5 à 6 TWh vers 1990-2000 ce qui représenterait 8 % de la production hydroélectrique française (fig. 2).

(11) 1 060 usines de puissance installée inférieure à 2 000 kW, produisant 1,6 TWh soit 2,5 % de la production actuelle. C'est généralement à ces usines ($P_i < 2\,000$ KW) qu'est réservé le nom de microcentrales.

Tableau IX. — Répartition mondiale estimée du potentiel équipé en 2000.

	Taux d'accroissement du potentiel équipé de 1978 à 2000	Potentiel équipable	Potentiel équipé en 2000		
	%	TWh	% du potentiel équipable	TWh	% du potentiel mondial
1) OCDE	1,8 % (10)	2 100	50 % $\times$ 1,45 = 72 %	1 500	15 %
2) URSS — Inde Mexique — Brésil Yougoslavie	5,6 %	2 100	16,5 % $\times$ 3,33 = 55 %	1 150	11,5 %
3) Un groupe en début de développement	7 %	2 600	4,7 % $\times$ 4,4 = 21 %	550	5,5 %
4) Un groupe en attente de développement	3,5 %	3 000	4,7 % $\times$ 2,1 = 10 %	300	3,0 %
	<u>3,5 %</u>	<u>9 800</u>		<u>3 500</u>	<u>35 %</u>

(10) 2,2 % pour USA-Canada.

Les zones à l'écart des grandes voies de desserte, dans les pays en voie de développement, ont vocation à être équipées de microcentrales hydrauliques plutôt que de diésels quand l'eau et la chute y sont disponibles. Mais les grandes sociétés distributrices d'électricité ne sont pas motivées par cet équipement de détail et un organisme national chargé de l'équipement et de la maintenance fait souvent défaut ! Et c'est paradoxalement dans les pays développés que se trouve le marché le plus actif de petits groupes pour microcentrales : le confort (chauffage économique des locaux) ou le profit (en France, rachat obligatoire par EDF) sont les motivations essentielles.

Centrales de pompage

Les centrales de transfert d'énergie par pompage utilisent l'eau en circuit fermé entre deux bassins, en vue de la fourniture d'électricité aux heures de pointe. Il ne s'agit plus de la mise en œuvre d'une énergie primaire mais du report d'une énergie d'heures creuses (en général thermique) pour disposer d'une puissance de pointe à moindre coût qu'avec une nouvelle centrale thermique.

Leur justification est triple :

- souplesse d'adaptation à la charge : celle des usines hydrauliques à réservoir ;
- grande puissance installée : on arrive à 1 000 MW de puissance installée avec des bassins de 7 hm³ (12) et une dénivelée de 250 m ;
- coût total actualisé, fonction du site (hauteur de chute et éloignement des deux bassins) inférieur à

(12) 1 hm³ = (100 m)³ = 10⁶ m³.

Figure 2 — Microcentrale sur la Dordogne. Groupe en siphon.

celui d'une usine thermique équivalente, fonctionnant à un rendement affaibli par celui du cycle pompage-turbine (0,72).

Leur développement, qui date de 1960 est remarquable : leur puissance installée s'élève déjà à 43 GW en 1978, soit 10,5 % de la puissance installée totale (408 GW en 1978) des usines hydrauliques classiques — les centrales en construction représentent 28 GW.

En France il y a 2 GW de pompage en service en 1980 pour 20 GW en hydraulique classique (10 %) ; 2,8 GW sont en construction (fig. 3).

Taille des aménagements hydroélectriques

Deux raisons conduisent à des aménagements hydroélectriques à très forte puissance installée.

La production d'électricité de 1950 à 1963 s'est accrue au taux de 9 % contre 6,5 % de 1925 à 1950 ; celui-ci s'est progressivement réduit pour n'être plus que de 5 % de 1974 à 1978 ; *on admet qu'il se maintiendra à cette valeur dans les 20 ans qui viennent.*

La croissance plus rapide de l'électricité, comparée à celle de l'énergie, s'est traduite par une "pénétration de l'électricité dans l'énergie" : la part de celle-là dans celle-ci est passée de 4 % en 1925 à 11 % en 1950, 20 % en 1970, 27 % en 1980 (même chiffre pour la France) ; les hypothèses de croissance retenues conduisent à 40 % en 2000.

L'hydroélectricité s'est accrue, à un rythme moins rapide que celui de l'électricité mais supérieur ou égal à celui de l'énergie. *On admet pour l'avenir un taux de croissance* toujours intermédiaire entre celui de l'électricité et de l'énergie, soit 3,5 %. Cette croissance intermédiaire a deux conséquences pour l'hydroélectricité :

— *la part de celle-ci dans l'électricité s'est réduite* passant de 40 % en 1925 à 30 % en 1960, 20 % en 1980 *pour arriver à 15 % en 2000* avec les hypothèses de croissance retenues ;

— sa part dans l'énergie par contre s'est accrue, passant de 1,7 % en 1925 à 4,4 % en 1950 et 5,3 % en 1974 ; l'accroissement est faible depuis 1950, car fortuitement la production d'hydroélectricité a augmenté sensiblement au même taux que celle de l'énergie ; avec les hypothèses de croissance retenues *la part de l'hydroélectricité* dans l'énergie devrait augmenter légèrement d'ici l'an 2000 *et se situer entre 6 et 7 %* (en France, le taux actuel est de 7,3 %), ce qui ne manque de surprendre quand on perd de vue les hypothèses de croissance retenues, soit 2,5 % pour l'énergie et 3,5 % pour l'hydraulique.

Résumé

Hypothèses admises

taux de croissance de l'économie	3 %
taux de croissance de la production d'énergie	2,5 %
" " " d'électricité	5 %
" " " d'hydro-	
électricité ...	3,5 %

Résultats en découlant :

l'hydroélectricité en l'an 2000 compterait pour 3 500 TWh (800 GW) et représenterait alors :

- le double de sa capacité actuelle ;
- 35 % du potentiel équipable ;
- 15 % de la production d'électricité ;
- 6,5 % de la production d'énergie.

(14) Dernière année pour laquelle sont publiées en 1981 les statistiques mondiales (World Energy Supplies - ONU - New-York).

(15) M. Pecqueur indique en [12] 2 700 Mtep d'électricité en 1990, alors qu'au Tableau VIII on a indiqué 3 040 Mtep. M. Pecqueur retient donc l'hypothèse d'une croissance de 4 % et non de 5 % de la production totale d'électricité jusqu'en 1990. Si non, la part du nucléaire serait de 21,4 %, comparable aux 21,7 % de l'hydraulique en 1978.

Conclusion

Elle tient en trois points :

1) En 1978 (14) l'hydroélectricité tient globalement une place modeste dans la production d'énergie (5,5 à 6 %) mais elle représente 22 % de la production d'électricité ; grosso modo, on peut dire qu'elle tient actuellement par rapport à l'énergie et l'électricité, la place que l'on assigne au nucléaire en 1990 [12] : 24 % de la production mondiale d'électricité et 7 % de la production mondiale d'énergie primaire (15).

2) La part équipée du potentiel équipable n'est que de 17 %.

3) Sa concentration sur certains pays et certains sites permet de penser que l'équipement hydroélectrique va s'étirer encore sur toute la première moitié du XXI^e siècle : nous ne serions temporellement parlant, qu'à mi-parcours (1910-1980-2050). De façon imagée, notons qu'il faut marquer en deuxième mi-temps quatre fois plus de buts qu'en première : c'est dire l'ampleur des tâches qui attendent bureaux d'études, entrepreneurs, constructeurs de matériel. ., et financiers.

Références bibliographiques

- [1] *L'offre mondiale de charbon*. Jacques Petitmengin et M. Ippolito-Charbonnages de France. Pétrole et Technique. Octobre 1981, publiée par l'Association Française des Techniciens du Pétrole, 14, avenue de la Grande Armée 75017 Paris, page 26.
- [2] *World Energy Supplies 1973-1978*, ONU, New-York, 1979. Département of International Economic and Social Affairs. Statistical Office. Statistical Papers Series J No. 22, page 275.
- [3] *Idem* [2], page 2.
- [4] *Enquête sur les Ressources Énergétiques*. Conférence Mondiale de l'Énergie (CME). 1974 publié par The United States Nat. Ctee of the World Energy Conférence, 345 East 47th Street, New-York, N.Y., 10017.
- [5] *World Energy Resources 1985-2000* - CME - 1978, publié par IPC Science and Technology Press for WEC, simultanément dans le Royaume-Uni et aux États-Unis.
- [6] *Enquête sur les Ressources Énergétiques* CME. 1980 préparée par l'Institut Fédéral des Sciences de la Terre et des Ressources Naturelles. Hanovre RFA. Le Tableau 4-7, non cohérent avec celui de la page précédente (349), paraît erroné.
- [7] *Le Courrier de l'UNESCO*. Juillet 1981, publié par l'UNESCO, Place de Fontenoy 75700 Paris, pages 9, 12 et 27.
- [8] *Statistiques pétrolières & énergétiques 1980*. Dépliant du 18.02.81 édité par le Comité Professionnel du Pétrole 51, boulevard de Courcelles 75008 Paris.
- [9] *Mise en service de l'aménagement de Cabora Bassa-Apollo à haute tension continue*. Rapport 14-13, CIGRE, Session de 1978.
- [10] *Une vue d'ensemble du comportement en service des réseaux de transport à courant continu dans le monde au cours de la période 1975-1978*. Rapport 14-08, CIGRE, Session de 1980.
- [11] *Hydroélectricité de faible puissance*. Session de la SHF des 17 et 18 mars 1981, Houille Blanche n° 4-5, 1981.
- [12] *L'offre mondiale d'énergie nucléaire*, Michel Pecqueur CEA, Pétrole et Technique, octobre 1981, voir [1].

Discussion

Président : M. M. COUPIN

Le Président. — Je remercie M. COTILLON qui non seulement a strictement respecté l'horaire imparti, mais a fait en outre un exposé extrêmement riche et nourri... ce qui, je pense, va également permettre une discussion intéressante entre la salle et lui-même.

S'agissant d'un exposé aussi complet, il est difficile d'en résumer les points forts.

M. COTILLON à juste titre, a insisté sur les incertitudes ; mais je dirai que si l'on prenait d'autres sources d'énergie on aurait certainement à mettre l'accent sur les incertitudes dans le domaine retenu.

On constate en effet dans le domaine de l'énergie une très grande pauvreté en ce qui concerne le recensement des ressources disponibles. Ce qui est sûr, c'est que les diverses ressources en énergie fossile de la planète ne sont pas inépuisables et qu'il convient d'éviter des utilisations excessives du pétrole. Il est donc important, pour un certain nombre de pays, de rechercher l'utilisation optimale des énergies renouvelables sans oublier que l'hydroélectricité est la première d'entre elles aujourd'hui. Cette énergie a d'ailleurs encore un énorme avenir devant elle, comme l'a montré M. COTILLON, compte tenu de l'écart important entre le potentiel équipé et le potentiel équipable et ceci quelles qu'en soient les incertitudes.

Je passe maintenant la parole à la salle pour les questions.

M. J. de BEAUREGARD. — Le panorama hydroélectrique mondial présenté par M. COTILLON donne l'occasion d'émettre le vœu que je confie aux personnalités du Ministère et de l'EDF qui sont à la tribune : "que la France célèbre avec faste le centenaire de l'électricité" (1).

Les raisons de cette manifestation sont sérieuses :

- la France est le berceau de l'électricité industrielle en général et de l'hydroélectricité en particulier : la houille blanche étant née près de Grenoble, vers 1882 ;
- l'électricité a métamorphosé la vie familiale, agricole, industrielle, les transports, les services et les loisirs. Hier inconnue, aujourd'hui indispensable, elle survivra à d'autres sources d'énergie : dans un siècle ou moins, le gaz et le pétrole auront disparu ou presque disparu alors que l'électricité continuera son développement ;
- enfin, et surtout pour nous Français, la crise économique mondiale actuelle est arrivée par le pétrole et la France ne pourra sortir de cette crise qu'en utilisant au maximum le vecteur énergétique qu'est l'électricité d'origine nucléaire et hydraulique.

Pour toutes ces raisons, la SHF devrait inciter les autorités compétentes à organiser le centenaire de l'électricité.

M. le Président. — Je dirai que l'objectif premier de la politique des Pouvoirs Publics dans le domaine de l'énergie est justement d'échapper au pétrole. C'est d'ailleurs ce que le large débat public de l'automne dernier a montré, avec le plan énergétique approuvé par le Parlement, plan qui laisse une très large part à l'électricité.

Bien sûr, cette recherche de l'indépendance énergétique ne concerne pas seulement l'électricité : l'électricité est un moyen et non pas une fin : et l'on passe d'une énergie dominante à un ensemble d'énergies diverses. La caractéristique de l'ère dans laquelle nous sommes entrés, c'est qu'il ne doit plus y avoir d'énergie dominante : on doit utiliser les énergies les plus variées de manière à échapper le plus vite possible à la dépendance pétrolière.

Cette place importante, mais non exclusive, de l'électricité étant rappelée, nous étudierons avec intérêt la suggestion de M. de BEAUREGARD.

M. GOUBET. — Dans son exposé, M. COTILLON conformément à la pratique usuelle, nous a présenté l'évolution de l'hydroélectricité en parlant essentiellement de kWh. Or, on constate que plusieurs pays industriels (France, Italie, Suisse, Suède...) qui ont à peu près terminé la mobilisation de leur potentiel hydroélectrique n'en continuent pas moins à déployer une grande activité dans ce domaine (indépendamment des usines de pompage) en suréquipant les usines existantes ; ces travaux n'augmentent pratiquement pas la production mais permettent de mieux placer, au moment des pointes de consommation, la production hydroélectrique qui représente un pourcentage relatif de plus en plus faible mais instantané de la consommation électrique totale. La notion de potentiel équipable (ou de production) exprimée en kWh ne permet pas de rendre compte de cet aspect du problème. Ne pourrait-on pas le prendre en compte, par exemple, en ajoutant à la notion de production annuelle celle d'énergie susceptible d'être stockée dans les réservoirs.

M. COTILLON. — Vous éclairez là un point particulier du panorama et c'est une autre façon de mettre en lumière le rôle que va continuer à jouer l'hydraulique sous la forme de suréquipements. Votre remarque comme toujours est excellente, mais dans les publications et les statistiques actuellement disponibles on en traite fort peu. Je n'ai donc pas eu matière à en débattre.

M. le Président. — Dans la très grande diversité des pays décrits par M. COTILLON toutes sortes de situations diverses d'utilisation de l'hydroélectricité se présentent : dans certains pays c'est l'apport en énergie qui est fondamental, dans d'autres comme en France, où le système énergétique est plus évolué et plus complexe, c'est la capacité de stockage d'électricité potentielle que permet l'hydroélectricité qui prend une importance croissante. La remarque de M. GOUBET peut certainement se situer dans ce cadre. C'est une raison de plus pour espérer que l'hydroélectricité ait encore un long avenir devant elle.

M. de MAUBLANC. — Pour compléter la remarque de M. GOUBET, je dirai que le sujet qui le préoccupe est précisément celui qui a retenu l'attention de certaines organisations internationales. Le problème que vous avez évoqué, qui se pose en France, en Suède, etc... aux statisticiens sur la façon de prendre en compte cette énergie stockée, fait l'objet d'études dans le cadre de l'UNIPED ; nous aurons l'occasion d'en reparler peut-être dans une autre enceinte ; mais je peux vous dire que c'est un problème au cœur des préoccupations actuelles.

M. le Président. — Pour rassurer M. GOUBET sur le peu de place que tient le suréquipement dans notre réunion de ce matin, je lui rappelle que M. DAUZIER présentera cet après-midi une communication précisément sur ce sujet.

D'autres interventions ? ... Non ... Je crois que ce silence traduit le caractère très complet de votre exposé et l'accord des participants sur vos conclusions et sur la place que vous avez faite au caractère quasi prométhéen de cette énergie tout à fait particulière et importante.

Je vous propose de passer au deuxième exposé de la matinée, celui que vous fera M. de MAUBLANC.

(1) Cet anniversaire a été célébré le 15 juin 1982 au Conservatoire National des Arts et Métiers par le professeur A. BUSSON, titulaire de la chaire occupée naguère par Marcel DEPREZ (1843-1918).

M. H. de MAUBLANC. — Tout à l'heure un intervenant a évoqué la perspective de la célébration du centenaire de l'électricité. A supposer qu'on puisse fixer une origine quelconque à l'électricité ou à son usage industriel (une origine en vaut une autre), pour ma part je préfère me référer aux années 1885 où les premières liaisons électriques de quelque importance en puissance et en distance ont été créées dans les Alpes. C'est dire

que dans notre pays (dont certains s'accordent à penser qu'il est l'inventeur de l'électricité industrielle et domestique) nous avons une centaine d'années d'expérience, ce qui est considérable.

Mais je dois dire que le sujet qui m'a été proposé m'a laissé quelque peu perplexe, puisqu'il s'intitule : les développements récents en France de l'ingénierie en hydroélectricité. . .

Abstract

Share of hydro-electric power in the world energy balance

Hydro power and other renewable energy sources arise from features that cannot be dissociated from the place they occur, unlike solid, liquid or gaseous fossil fuels of non-renewable energy sources that are readily transportable. Hydro power is only able to come into its own in combination with electricity, but river harnessing has always been seen as man's triumph over the forces of nature and has become something of a religious crusade.

Total developable hydro potential is estimated at 10 000 – 12 000 TWh, representing 27 % to 33 % of the total theoretical potential put at 36 000 TWh. But authors calculate in energy or capacity using different units of measurement, and there are many errors in the literature. Hydro power is more evenly distributed throughout the world than coal, oil, gas or uranium reserves although within large regions like the African continent, there is considerable imbalance with most of the potential being concentrated in a few countries or even at a few sites like Inga.

In 1978 developed potential (expressed as actual electricity output in that year) represented 17 % only of developable potential (98 000 TWh) and 21.7 % of total electricity production. But two-thirds of the developed potential was confined to the 24 OECD countries, which have harnessed 50 % of their potential on average ; France, by the end of 1981, had reached a figure of 90 %.

By the year 2000, 35 % might be developed, with the OECD countries accounting for 15 % , USSR, India, Mexico, Brazil and Yugoslavie 12 %, and the rest of the world 8 %.

Long transmission distances will not be a brake on development. The new thyristor rectifier technology for large-capacity d.c. lines is promising.

Mini-hydro is not a universal cure and can only contribute a few percent of output.

Pumped storage, expanding fast in Japan, USA and Western Europe is just as attractive to engineers and the construction industry as conventional hydro but it does not produce energy ; it merely stores it for later use. The plants are sometimes very large indeed (1 800 MW at Dinorwic in Wales).

Conventional hydro schemes are also growing in size, being increasingly sited on large rivers in the plains (10 000 m³/s average river flow at Itaipu in Brazil). Where alternative capacity exists on the grid, hydro is being used for peaking duty (10 000 MW at Grand Coulee on the Columbia and at Guri on the Caroni in Venezuela).

The share of hydro in total electricity will have dropped from 40 % in 1925 to 13 % by the year 2000. But its share in total energy, which rose from 1.7 % in 1925 to 5.3 % in 1974, is expected to reach 6-7 % by the end of the century since predicted annual growth rates are : total energy 2.5 %, hydro 3.5 %, total electricity 5 %, for a world economic growth of 3 %.

By 1978, hydro power occupied the same place in electricity output as nuclear power is expected to do by 1990.