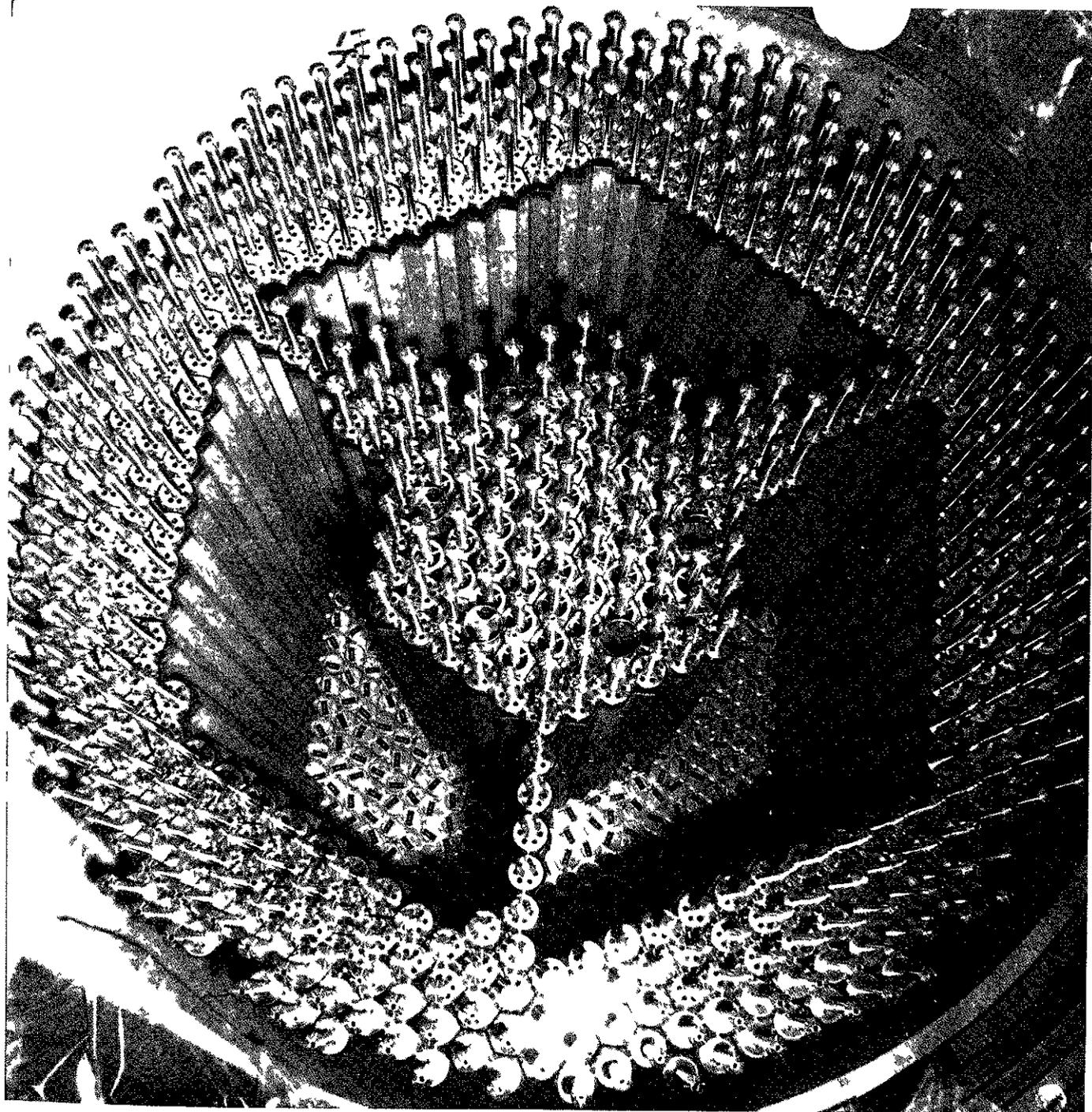
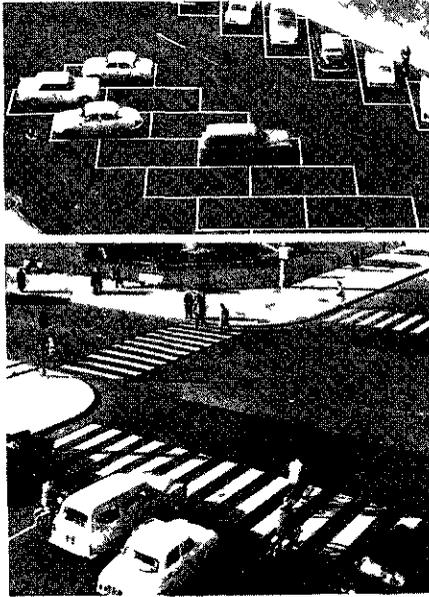


L'Énergie



les bandes ZEBRA sont également une sécurité pour votre budget



Vous êtes responsable de la sécurité de vos administrés et de celle du budget voté. Pour concilier ces deux obligations, vous devez aborder en connaissance les problèmes de signalisation au sol de votre ville.

Périodiquement, vous devez créer ou refaire le marquage au sol des passages protégés, des bandes de stop ou délimiter de nouveaux parkings. Il vous faut :

RAPIDITÉ : rapidité d'application et suppression du temps de séchage afin d'éviter les embouteillages que provoquent toujours la condamnation d'une voie de circulation.

ÉCONOMIE : utilisation d'un matériau durable évitant les frais de rénovation toujours très élevés.

EFFICACITÉ : des signalisations d'entretien facile pour rester toujours parfaitement visibles et assurer la sécurité des usagers.

PRISMO depuis 15 ans travaille avec les municipalités et les Ponts et Chaussées et met à leur disposition depuis 1957 les bandes **ZEBRA** qui répondent à ces impératifs.

Seule bande plastique qui se pose à chaud selon un procédé breveté ou à froid à la colle, la bande **ZEBRA** est d'application facile. Elle est anti-

derapante (une sécurité de plus) et d'un entretien nul puisqu'elle se relave à chaque pluie. La bande **ZEBRA** possède actuellement en France les références de plus longue durée : 6 à 7 ans.

Quand les bandes **ZEBRA** sont posées par les équipes d'applicateurs de **PRISMO**, cette pose est assortie d'une garantie de 2 ou 3 ans selon le revêtement.

Car **PRISMO, entreprise à services complets** met aussi à votre disposition de nombreuses équipes dans toute la France. **Faites appel à nous, nous trouverons votre solution.**

Je désire recevoir, sans engagement de ma part

• une documentation gratuite

• la visite d'un représentant

Nom

Adresse

Telephone

PC 2

PRISMO FRANCE

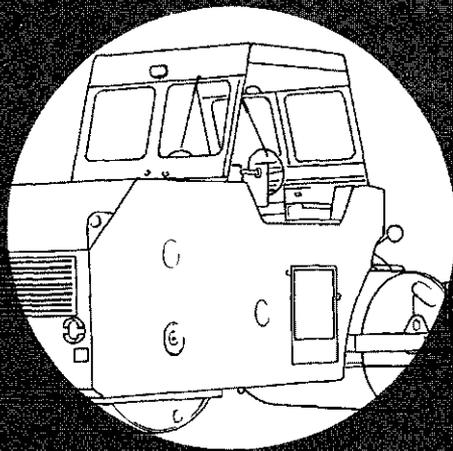
53 RUE JEAN BONAL - 92 LA GARENNE-COLOMBES - TEL. 782.35.00

S O M M A I R E

<i>Préface</i>	J. Couture.	25
<i>L'énergie dans le monde en quelques chiffres</i>		26
<i>L'évolution de l'industrie houillère</i>	J.-C. Achille.	31
<i>Quelques considérations sur l'industrie pétrolière</i> ..	F. Didier.	35
<i>Faits porteurs des avènements possibles de l'énergie électrique</i>	P. Ailleret.	41
<i>Les centrales nucléaires à neutrons rapides</i>	G. Vendryes.	57
<i>Mutations, Promotions et décisions diverses</i>		71
<i>Offres de postes</i>		75
<i>Mariage, décès</i>		75
<i>Les Annales des Mines</i>		76
<i>La Page du Trésorier</i>		77

Photo de couverture : « Disposition des Assemblages dans la cuve de Rapsodie. »

COMPACTEZ "PNEUS EN TÊTE"



... ET FINISSEZ
AU TANDEM



DHT
de 8 à 12 tonnes

- convertisseur de couple
- embrayage hydraulique
- moteur de 74 Ch - SAE
- direction assistée
- double poste de conduite
- roue AV. et châssis de largeur égale

ALBARET

Préface

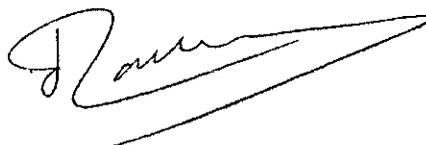
par **Jean COUTURE**, Ingénieur Général des Mines, Secrétaire Général de l'Énergie.

Le secteur de l'énergie a connu depuis quelques années une évolution rapide et même pourrait-on dire, une véritable mutation dans les domaines de la production, du transport et de la mise en œuvre. Placée sous le signe de la mobilité, cette transformation a donné un nouvel aspect au tableau énergétique et bouleversé les principales données du problème.

La mobilité physique des matières et des services énergétiques est devenue une de leurs caractéristiques les plus évidentes : le développement des différents moyens de transport et l'accroissement de leur capacité ont rendu de plus en plus économiques, et donc de plus en plus massifs, les transports à longue distance. On assiste ainsi à un affaiblissement considérable du déterminisme géographique qui avait marqué toute la période précédente : celle de la révolution industrielle où s'était modelée l'économie des pays occidentaux. L'atome va venir accentuer encore le sens de cette évolution, puisque l'extrême densité énergétique du combustible nucléaire, jointe à l'importance des investissements nécessaires à son utilisation, réduit jusqu'à le rendre négligeable le coût relatif de son transport : dans la nouvelle ère qui s'ouvre, ce ne sont plus les richesses naturelles qui gouverneront les déterminismes énergétiques et industriels, mais bien les acquis incorporels de la technologie.

Sur le plan du marché, on constate parallèlement une intercommunication croissante des diverses sources d'énergie : leurs possibilités de substitution réciproque ont tendance à « globaliser » le problème de l'énergie en rendant ses éléments solidaires, remettant ainsi en question les mérites respectifs — et parfois mouvants — de chaque source d'énergie aux plans du coût, de la commodité et de la sécurité d'emploi. Cette intercommunication pose le problème de l'optimum économique d'emploi de l'énergie : il faut essayer d'en définir les paramètres et de les combiner au mieux. La diffusion des progrès réalisés dans les techniques d'utilisation, permet, à son tour, de réduire ou de supprimer les éléments qui pourraient fausser les conditions de concurrence entre les diverses sources d'énergie et, par voie de conséquence, d'éliminer progressivement les choix inadéquats de la part des consommateurs. Ainsi, c'est au potentiel des grandes régions consommatrices que tous les dispositifs doivent se référer : leurs activités « appellent » l'énergie — et leurs besoins ne peuvent manquer de trouver une contrepartie dans le domaine de l'offre.

En définitive, c'est l'intercommunication qui se présente comme le trait dominant de l'énergie dans le présent — et tout laisse supposer que cette tendance ne fera que s'accroître. Si bien que, dans ce domaine comme en beaucoup d'autres, ce qui importe avant tout, c'est d'aménager en temps utile les nécessaires adaptations et la tâche principale des responsables, ici encore, est de « gérer » le changement.



L'énergie dans le monde en quelques chiffres

Les quatre tableaux joints donnent une idée schématique des problèmes énergétiques à l'échelle du monde.

Ils se limitent aux chiffres essentiels et aux pays les plus importants.

Ils proviennent d'une publication périodique de l'ONU : « World Energy Supplies », et plus particulièrement du dernier volume relatif à 1962-65.

Les deux premiers tableaux donnent la répartition entre les Continents et entre les principaux pays de la production et de la consommation d'énergie en 1965, en distinguant les quatre grandes formes d'énergie primaire.

On y a rappelé les chiffres de 1955 et de 1960 pour l'ensemble du monde. En dix ans la production d'énergie a augmenté de 62% (26% pour les combustibles solides ; 95% pour les liquides ; 135% pour le gaz naturel et 97% pour l'hydroélectricité).

Le tableau III donne l'évolution de la répartition en pourcentage de la consommation entre les quatre grandes sources d'énergie primaire. On y constate la décroissance régulière plus ou moins rapide suivant les pays de la part relative des combustibles solides et la progression concomitante des hydrocarbures liquides et gazeux, sauf aux U.S.A. qui semblent avoir atteint un certain équilibre.

On y note également quelques pays très « charbonniers » où le pourcentage des combustibles solides dépasse encore 50% : Pologne 92% ; Angleterre 65,6% ; Allemagne et Belgique 59%.

Le tableau IV enfin, donne l'évolution depuis 1929 de la consommation d'énergie par habitant pour les principaux pays du monde.

TABLEAU I
 PRODUCTION D'ÉNERGIE EN 1965
 (Millions de t.e.c.) (1)

PAR CONTINENT		TOTAL	CHARBON ET LIGNITE	PETROLE BRUT	GAZ NATUREL	ÉLECTRICITÉ HYDRO ET NUCLÉAIRE (3)	
MONDE	1955	3 290	1 807	1 026	398	59	
	1960	4 296	2 192	1 396	622	86	
	1965	5 331	2 278	2 000	937	116	
	%						
Amerique		40,1	2 135	493	898	697	46
	USA	30,6	1 633	476	527	605	25
	Canada	2,5	135	9	56	55	15
	Venezuela	4,6	246	—	238	9	—
Europe occidentale		10,8	574	481	27	27	39
	CEE	5,8	311	252	21	24	14
	Belgique Lux	0,4	20	20	—	—	—
	France	1,3	70	53	4	7	6
	Allemagne	3,4	184	167	10	4	2
	Italie	0,4	20	1	3	10	6
	Pays-Bas	0,3	17	12	3	2	—
	ACLE	4,1	221	195	4	2	20
	Grande-Bretagne	3,6	193	190	—	—	3
Asie		15,7	837	140	669	15	13
	Moyen Orient	12,0	638	6	626	5	1
	Inde	1,4	74	68	4	—	2
	Japon	1,2	62	50	1	2	9
Océanie		0,8	44	41	—	—	2
Afrique		2,1	112	54	55	3	1
Monde communiste		30,5	1 628	1 069	350	195	14
	URSS	17,4	929	433	316	170	10
	Pologne	2,4	128	126	—	2	—
	Chine (2)	6,3	337	322	13	—	3

(1) t.e.c. tonne d'équivalent charbon

1 tonne de pétrole brut = 1,3 t.e.c.

1000 mètres cubes de gaz naturel = 1,33 t.e.c.

1000 kWh = 0,125 t.e.c.

Ce dernier coefficient retenu par l'ONU correspond à l'équivalence calorifique d'usage de l'électricité, ce qui sous-évalue son importance. Voir à ce sujet le renvoi du tableau III.

(2) Y compris pays communistes d'Asie : Nord Vietnam — Nord Corée — Ces chiffres sont incertains.

(3) Sur les 116 millions de t.e.c. ; d'électricité primaire, l'électricité d'origine nucléaire représente 3 millions de t.e.c., dont près de 2 en Angleterre.

Ainsi qu'on l'a indiqué au renvoi (1) ci-dessus, il s'agit des équivalences en valeur calorifique d'usage. En fait cette production d'électricité nucléaire a économisé près de 10 millions de t.e.c. (dont les deux tiers en Angleterre) qui auraient été nécessaires dans des centrales classiques pour produire la même quantité d'électricité (24 TWh dont 15,8 en Angleterre).

TABLEAU II
CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN 1965
en M t.e.c. — en kg ec par habitant

PAR CONTINENT		PAR HABITANT		TOTAL	COMBUSTIBLES SOLIDES	COMBUSTIBLES LIQUIDES	GAZ NATUREL ET IMPORTÉ	ÉLECTRICITÉ PRIMAIRE ET IMPORTÉE (2)
MONDE	1955	1 201		3 219	1 816	948	395	59
	1960	1 402		4 230	2 205	1 322	617	86
	1965	1 594		5 231	2 261	1 921	933	116
			%					
Amérique		4 622	40,6	2 124	459	927	684	46
	USA	9 201	34,2	1 790	425	723	617	25
	Canada	7 655	2,9	150	23	71	41	15
Europe Occidentale		3 049	20,0	1 045	515	463	28	39
	CEE	3 154	11,0	573	267	267	24	15
	Belgique Lux.	4 724	0,9	46	28	18	—	—
	France	2 950	2,7	144	67	64	7	6
	Allemagne	4 234	4,8	250	147	96	4	2
	Italie	1 787	1,8	92	12	64	10	6
	Pays-Bas	3 258	0,8	40	14	24	2	—
	A.E.L.E.	4 176	7,5	390	205	162	3	19
	G.B.	5 153	5,4	282	185	93	1	3
Asie		327	7,2	379	156	193	15	13
	Inde	172	1,6	84	67	14	—	2
	Japon	1 785	3,3	175	64	99	3	9
Océanie		3 634	1,2	62	34	26	—	2
Afrique		322	1,5	77	52	22	1	1
Monde communiste		1 449	29,5	1 543	1 043	291	195	14
	URSS	3 611	15,9	833	414	239	170	10
	Pologne	3 504	2,1	110	102	6	2	—
	Allemagne Est	5 459	1,8	93	87	5	—	—
	Tchécoslovaquie	5 667	1,5	80	72	6	1	1
	Chine (1)	461	6,5	338	320	15	—	3

(1) Y compris autres pays communistes d'Asie : Nord Vietnam, Nord Corée. Ces chiffres sont incertains.

(2) Voir au tableau III le renvoi relatif à la sous-évaluation de l'électricité.

TABLEAU III
EVOLUTION DE LA RÉPARTITION EN POURCENTAGE
DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE SUIVANT LES SOURCES

		COMBUSTIBLES SOLIDES	COMBUSTIBLES LIQUIDES	GAZ NATUREL ET IMPORTÉ	ÉLECTRICITÉ PRIMAIRE ET IMPORTÉE
Monde	1929	79,4	15,5	4,3	0,8
	1937	73,5	19,9	5,4	1,2
	1950	61,5	26,9	10,0	1,6
	1955	56,4	29,5	12,3	1,8
	1960	52,1	31,3	14,6	2,0
	1965	43,3	36,7	17,8	2,2
USA	1955	26,2	41,1	31,3	1,4
	1960	23,8	40,4	34,4	1,4
	1965	23,7	40,4	34,5	1,4
CEE	1955	79,0	16,9	1,7	2,4
	1960	64,7	29,3	3,1	2,9
	1965	46,6	46,6	4,2	2,6
Belgique Lux.	1955	83,7	16,1	0,1	0,1
	1960	75,5	24,2	0,2	0,1
	1965	59,4	39,9	0,2	0,5
France	1955	73,0	23,1	0,5	3,4
	1960	62,2	30,0	3,3	4,5
	1965	46,5	44,4	4,9	4,2
Allemagne	1955	92,1	6,6	0,3	1,0
	1960	78,7	19,7	0,5	1,1
	1965	59,2	38,4	1,6	0,8
Italie	1955	33,2	41,8	13,9	11,1
	1960	20,4	54,0	15,3	10,3
	1965	13,0	69,6	10,9	6,5
Pays-Bas	1955	69,4	29,7	0,8	0,1
	1960	48,4	50,1	1,5	—
	1965	33,8	60,2	6,0	—
A.E.L.E.	1955	77,6	19,4	0,3	2,7
	1960	65,1	30,8	0,6	3,5
	1965	52,7	41,6	0,8	4,9
G.B.	1955	86,2	13,7	—	0,1
	1960	76,2	23,6	—	0,2
	1965	65,6	33,0	0,3	1,1
Japon	1955	70,0	20,6	0,3	9,1
	1960	57,4	34,9	0,9	6,8
	1965	36,6	56,6	1,7	5,1
Monde communiste	1955	83,2	13,5	2,7	0,6
	1960	79,8	14,0	5,5	0,7
	1965	67,6	18,8	12,7	0,9
URSS	1955	76,4	20,3	2,7	0,6
	1960	63,7	25,5	9,8	1,0
	1965	49,7	28,7	20,4	1,2
Pologne	1955	96,2	2,7	1,0	0,1
	1960	95,2	3,5	1,1	0,1
	1965	92,3	5,5	2,1	0,1

NOTA : L'hydroélectricité étant convertie d'après son équivalence calorifique d'usage (et non de production) son influence relative est très sous-estimée.

Si, comme il est d'usage en France, on prend comme coefficient d'équivalence la quantité de combustible nécessaire pour produire 1 kWh (coefficient variable dans le temps), il faut multiplier les pourcentages relatifs à l'hydroélectricité par 3 environ pour les années récentes, par 4 pour 1950, par 5 pour 1937 et par 7 pour 1929.

On trouve alors pour le monde entier que l'hydroélectricité a représenté depuis 1929 un pourcentage stable voisin de 6%.

TABLEAU IV

EVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PAR HABITANT POUR QUELQUES PAYS
en kilogramme e.c. par habitant

	1929	1937	1950	1955	1960	1965	1965/1929	1965/1937	1965/1955
Monde	910	950	1 120	1 201	1 402	1 594	1,75	1,68	1,33
USA	6 570	5 890	7 510	7 768	8 012	9 201	1,40	1,56	1,18
CEE	2 240	2 190	1 888	2 250	2 570	3 154	1,41	1,44	1,40
Belgique Lux.	4 530	4 020	3 500	4 084	3 974	4 724	1,04	1,18	1,16
France	2 420	2 120	2 030	2 166	2 435	2 950	1,22	1,39	1,36
Allemagne	2 940	3 020	2 635	3 361	3 669	4 234	1,44	1,40	1,15
Italie	610	660	630	721	1 134	1 787	2,93	2,71	2,48
Pays-Bas	1 860	1 790	1 960	2 376	2 850	3 258	1,75	1,82	1,37
Angleterre	4 110	4 280	4 420	4 993	4 903	5 153	1,25	1,20	1,03
Inde	70	90	100	114	140	172	2,46	1,91	1,72
Japon	740	930	780	740	1 164	1 785	2,41	1,92	2,41
URSS	420	1 070	1 780	2 240	2 860	3 611	8,60	3,37	1,61
Chine (1)	60	70		159	446	461	7,68	6,59	2,90

(1) Y compris les autres pays communistes d'Asie : Nord Vietnam, Nord Corée.

L'évolution de l'industrie houillère

par **Jean-Claude ACHILLE**, Directeur des Charbonnages de France.

Depuis dix ans, l'industrie houillère européenne est entrée dans une crise, dont plus que jamais, on peut se demander comment elle sortira. C'est l'exemple principal, mais non le seul, d'une crise plus générale, qui affecte en réalité l'ensemble des industries extractives européennes, charbon aussi bien que minerai de fer ou autres métaux, et même pétrole indigène. L'agriculture de l'Europe connaîtrait probablement des difficultés de même ordre, si des mesures de protection considérables n'étaient prises en sa faveur.

Plus que d'un mouvement conjoncturel analogue à ceux du passé il s'agit cette fois de la dernière phase d'une époque du développement de l'Europe industrielle : la houille européenne cesse d'exercer cette suprématie dont elle avait marqué, dès sa naissance, le monde moderne.

Il est normal qu'une telle idée ait mis quelque temps à s'imposer aux industriels et aux politiques. L'expérience des nombreuses crises passées et surmontées conduisait à ne pas accorder une attention suffisante aux conséquences d'un progrès technologique extrêmement rapide, en particulier celui des transports maritimes, qui a mis en concurrence immédiate les gisements européens, vieillissants, avec les meilleurs gisements mondiaux, américains en l'occurrence.

En même temps, une offensive encore plus vigoureuse était menée par les produits pétroliers, favorisée également par l'abaissement des coûts de transport et de production. Il y a une douzaine d'années, la première crise de Suez, et l'an dernier la fermeture du canal ont précipité la recherche de gisements nouveaux et l'accroissement des capacités de transport, entraînant une pléthore de pétrole. En outre, la baisse des prix a été accentuée par l'arrivée de nouveaux producteurs, — sociétés américaines dites « indépendantes », sociétés d'Etat en France, en Italie, en Espagne, enfin les organismes des pays de l'Est, luttant pour se faire une place sur le marché mondial.

Les conséquences de cette concurrence pour les Houillères européennes sont bien connues : alors que de 1945 à 1958 l'énergie manquait, et que les mines devaient faire tous leurs efforts afin de fournir le plus de charbon possible, maintenant, et à l'inverse, leur politique est de tout faire pour réduire cette production.

Ainsi le sort de l'industrie houillère est fixé par l'ensemble du processus énergétique, non pas seulement à l'échelle européenne, mais à l'échelle mondiale. Or, l'énergie présente un ensemble de caractéristiques qui la distinguent de la plupart des autres produits ou matières premières.

1°) L'énergie est un produit de première nécessité, pour l'industrie et même pour la vie domestique. C'est pourquoi son marché est très rigide. Que son prix diminue de 20 ou 30% cela n'incite guère à en consommer beaucoup plus ; qu'il augmente dans les mêmes proportions, on n'en consommera guère moins.

On a donc beaucoup trop dit que le prix de l'énergie est un élément décisif pour l'ensemble de l'économie ; en fait, le seul problème vraiment important c'est que l'indus-

triel puisse en disposer en quantité nécessaire et que chacun en dispose à un prix voisin de celui de ses concurrents. Le coût de l'énergie ne représente en effet que trois à quatre pour cent de la production nationale ; ce n'est pas négligeable, mais cela montre qu'une variation de son prix, même de 20% n'aurait qu'une incidence faible sur l'ensemble de l'économie. Certes cette incidence est plus forte dans certaines industries grosses consommatrices ; mais même dans celles-ci il faut parfois y regarder de plus près ; il apparaît par exemple que dans l'industrie sidérurgique, l'influence sur le prix de revient de l'acier des variations de prix du coke n'est pas plus importante que, par exemple, les variations que l'on rencontre usuellement sur le taux d'utilisation des installations. C'est peut-être là une des raisons pour lesquelles la sidérurgie japonaise, qui achète ses combustibles plus cher que la sidérurgie européenne, pratique cependant des prix plus bas. A l'inverse, aux Etats-Unis, les prix des charbons à coke et des cokes sont extrêmement bas, et les prix de l'acier sont élevés, parce qu'ils sont mieux « tenus » par les producteurs.

Ce n'est pas parce que l'énergie est nécessaire qu'elle doit nécessairement ne pas coûter cher. On constate une confusion analogue pour le pain ou pour l'eau, que chacun considère comme indispensables et comme devant être par conséquent très bon marché.

2°) Si l'énergie est un produit de première nécessité, tout pays industriel doit pouvoir disposer de ressources énergétiques croissantes. L'Europe occidentale a connu cette situation jusqu'au lendemain de la dernière guerre, et a pu en conséquence tenir le rôle de leader du monde industriel et politique. Mais ses ressources naturelles, notamment houillères, sont largement amputées par une exploitation intensive, et elle doit recourir à l'importation dans des proportions qui ne cessent de croître. Cela conduit les Européens à se préoccuper sérieusement de la sécurité de leur approvisionnement en énergie.

Sécurité, mais par rapport à quel risque ? A l'approvisionnement à long terme, a 10 ou 15 ans ? On admet généralement qu'il ne se posera de grave problème dans ce délai pour aucune source d'énergie. Les réserves de charbon sont considérables et certainement beaucoup plus importantes que les réserves de pétrole ; les schistes bitumineux seront un jour exploitables et fourniront peut-être des ressources énormes ; en matière nucléaire, on peut espérer que la surgénération interviendra assez rapidement pour accroître les ressources en uranium. Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut craindre cependant que la couverture des besoins soit moins assurée vers la fin du siècle.

Sécurité pour le cas de guerre ouverte ? Seuls les deux grands et la Chine peuvent étudier de façon sérieuse cette hypothèse. Les autres pays, et notamment les Européens, ne peuvent guère assurer leur approvisionnement énergétique dans ce cas extrême, et il faut bien reconnaître que c'est grave pour leur indépendance politique.

Sécurité par rapport aux conflits limités, par exemple aux crises du Moyen-Orient ? Là se trouve sans doute un risque dont on s'occupe beaucoup plus peut-être parce qu'il est plus probable mais peut-être aussi parce que nous sommes mieux en mesure de lui trouver une solution. Deux ou trois crises de cet ordre ont déjà été surmontées sans trop de difficultés, et les optimistes en concluent qu'en réalité le danger était plus apparent que réel ; les autres penseront au contraire que le miracle ne saurait se reproduire à tous les coups.

Quoiqu'il en soit, il faut reconnaître que ce problème de sécurité inspire d'ores et déjà quantité de mesures, dont le coût figure rarement dans le prix de l'énergie.

3°) Une troisième caractéristique de l'économie de l'énergie, est qu'elle ne peut supporter de brusques fluctuations. Dans cette industrie, plus encore que dans d'autres, on a besoin d'une stabilité relative, ou tout au moins d'une progressivité de l'évolution. Il ne faut pas être emporté par l'événement, il faut conserver un contrôle des changements, sans pour cela faire obstacle au progrès, et cette nécessité est particulièrement impérative pour l'industrie houillère.

C'est une nécessité pour les producteurs, car une industrie de main-d'œuvre ne peut se permettre de modeler son activité sur des fluctuations soudaines.

C'est aussi une nécessité pour le consommateur, ainsi du moins semblent l'estimer les gouvernements. Les exemples sont innombrables des hausses de prix qui ont été

bloquées par les pouvoirs publics des différents pays ces vingt dernières années, qu'il s'agisse des hausses du charbon interdites par le Gouvernement français quand la situation les appelait, soit après la guerre, soit lors de la crise de Suez, et qui auraient permis de compenser les pertes antérieures ou postérieures ; qu'il s'agisse des hausses du prix du gaz naturel aux États-Unis, interdites à intervalle régulier par le Gouvernement ; qu'il s'agisse des hausses des combustibles pétroliers, limitées ou interdites en Europe lors de l'actuelle crise du Moyen-Orient, ou parfois reportées sur l'essence, parce qu'elle intervient moins directement dans les prix de revient industriels et n'est pas soumise à la concurrence de façon aussi directe.

C'est enfin une nécessité pour les travailleurs. Certes, il serait impossible et dangereux de cristalliser les hommes là où ils sont et dans le métier qu'ils font. Mais on doit constater que les limites à la mobilité et au changement sont assez vite atteintes. Chez les ouvriers, mais aussi chez les cadres, une perspective moins bonne quant au niveau de vie est fréquemment préférée si elle s'accompagne de la sécurité du lendemain.

Au plan économique, la conversion du personnel pose la question de savoir qui doit en supporter le coût : l'industrie en régression, qui n'en a pas les moyens, le contribuable, qui est, en tant que tel, étranger à la question, ou le consommateur du produit de substitution, qui profite de son meilleur marché. La dernière formule présente au moins cet avantage de réduire le déséquilibre charbon-pétrole au lieu de l'augmenter. Ce genre de problème ne peut se régler correctement — c'est-à-dire sans trouble social susceptible de remettre en cause l'ensemble de la politique choisie — qu'à moyen terme, ce terme étant plus ou moins lointain suivant les habitants, les mœurs et les circonstances.

Pour ces diverses raisons, et bien d'autres encore, le marché de l'énergie n'a pu échapper, et n'a, en fait, jamais échappé à une certaine mise en ordre, à une certaine coordination. Une autorité doit intervenir pour éviter des catastrophes, et dans tous les pays du monde, on constate des interventions autoritaires. Le problème n'est pas de savoir s'il faut une autorité économique centrale, il est seulement de savoir qui sera cette autorité, si elle sera publique ou si elle sera privée, si elle sera simple ou complexe.

Cette nécessité de décisions centralisées a entraîné partout soit des ententes, cartels ou autres, soit des interventions gouvernementales. Les exemples sont constants depuis qu'existent des producteurs d'énergie : comité d'organisation des Houillères, organisations de la Ruhr, fixation des prix du pétrole brut par les sociétés internationales et certains gouvernements. Cela ne veut pas dire d'ailleurs que la concurrence ne doit pas jouer un certain rôle ; elle le doit, au contraire, dans le cadre d'un certain nombre de décisions d'ensemble qui dépassent les secteurs individuels.

En Europe, la difficulté fondamentale de toute politique énergétique est de coordonner entre eux des ensembles charbonniers qui ont leur organisation professionnelle, gouvernementale ou supranationale mais qui est propre aux producteurs européens, avec des ensembles pétroliers beaucoup plus importants, organisés sur un plan qui dépasse très largement l'Europe et les problèmes européens. La coordination d'ensembles qui ne sont pas établis sur les mêmes bases est probablement l'un des principaux obstacles à une politique européenne commune.

✽

Dans cette perspective, le charbon apparaît comme la victime de l'accélération de l'histoire, accélération que l'on constate partout, dans la science, dans la démographie, dans l'éducation, et bien entendu dans toutes les réalités industrielles. Il a fallu peu d'années pour que le quasi-monopole séculaire du charbon fut battu en brèche et détruit par les énergies concurrentes. Mais ce n'est là qu'un exemple d'un phénomène beaucoup plus général dans l'industrie, lui-même reflet de l'évolution de toute la société. Naguère le temps marchait moins vite, les amortissements pouvaient s'opérer tranquillement, les reconversions se faisaient d'une génération à l'autre. Aujourd'hui l'accélération du mouvement fait apparaître quantité de problèmes nouveaux et urgents qu'on laissait autrefois au temps le soin de résoudre.

Le plus pressant de ces problèmes, au moins pour ceux qui en ont la charge,

est celui de l'avenir de l'entreprise « Charbonnages de France ». A cet égard, on peut considérer qu'il existe deux écoles de pensée. La première verrait volontiers l'entreprise décliner en même temps que sa production principale, et se justifie le plus souvent par des arguments d'ordre juridique, tels que la « vocation » assignée aux Houillères par la loi de nationalisation. La seconde, qui s'appuie essentiellement sur des considérations d'économie et de stratégie industrielle, et où se retrouvent, il ne faut pas s'en étonner, les dirigeants et le personnel de l'entreprise, estime que celle-ci constitue un outil efficace et disponible qu'il serait dommageable de détruire, et qu'il convient par conséquent que la faculté lui soit laissée d'étendre ses activités, au moins dans des branches connexes à celles où elle est déjà présente à mesure que décline l'extraction charbonnière. Pour eux, l'entreprise transcende le produit, et les exemples ne manquent pas, à l'appui de leur thèse, de grandes firmes qui ont complètement renouvelé leurs activités au cours des ans : il y a loin de la fabrique des glaces créée au temps de Colbert à Saint-Gobain, aux activités chimiques ou atomiques de la grande firme qui porte aujourd'hui ce nom. Il est d'ailleurs à noter que cette diversification de l'entreprise minière avait été entreprise bien avant que l'activité minière parût menacée : les industries de transformation — centrales électriques, cokeries, chimie surtout — ne représentaient pas loin de la moitié du chiffre d'affaires des principaux bassins houillers.

Le débat le plus significatif a été soulevé à propos des activités chimiques, pour lesquelles se posait un problème particulier. Si les Houillères figurent en effet depuis toujours parmi les entreprises importantes de la chimie française, c'était jusqu'à une date récente en utilisant uniquement des matières premières provenant de la distillation de la houille ; la chimie était une façon de valoriser au mieux des sous-produits. Or, le développement rapide de la production chimique d'une part, la baisse de la production charbonnière d'autre part se conjuguent pour réduire progressivement l'importance relative de la chimie des Houillères, et préfigurent sa disparition à terme si elles ne pouvaient avoir accès à de nouvelles matières premières. Pour les Houillères, c'était là une ligne de conduite nouvelle, quoique semblable à celle qu'aurait cherché à adopter toute entreprise privée en pareille circonstance : faire usage de matières premières issues du pétrole, et passer ainsi d'une chimie « fatale » à une chimie « volontaire ».

La valeur de ces arguments a été reconnue par les pouvoirs publics, qui ont autorisé les Houillères à développer d'importants investissements en vue de compléter et de renforcer leurs productions carbochimiques par des productions pétroléochimiques. Cette novation a d'ailleurs été l'occasion d'une transformation plus complète, visant à donner à la branche chimie des Houillères davantage d'autonomie par rapport aux traditions et aux règles de l'industrie houillère, et à lui permettre d'adopter un comportement industriel semblable à celui des firmes chimiques concurrentes : je fais allusion au regroupement, intervenu au début de 1968, de toutes les activités chimiques des Houillères en une seule société (de droit privée, mais appartenant à 100% au groupe C.d.F.) : la Société chimique des Charbonnages.

Cet exemple suffit à montrer que les structures juridiques, immobiles par nature, doivent céder le pas aux nécessités découlant de l'évolution économique, qui elle, n'arrête pas. Privée ou publique, une grande entreprise a le devoir de rechercher sans cesse les voies et les moyens de son adaptation à une réalité changeante. Pour l'industrie houillère, la crise charbonnière doit être l'occasion non du repliement et du dépérissement, mais d'une réflexion plus poussée sur son devenir industriel et d'initiatives prudentes certes, et menées avec le plus grand souci de rentabilité et de cohérence avec l'ensemble des activités du groupe, mais seules susceptibles d'assurer la pérennité de l'entreprise, et d'utiliser au mieux le dynamisme et les capacités des hommes qui l'ont faite ce qu'elle est.

Quelques considérations sur l'industrie pétrolière

par **François DIDIER**, Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Directeur Général Adjoint d'ELF UNION (1).

Il y a quelque imprudence à répondre positivement à une demande, fut-elle très amicale, de « faire un article » sur un sujet aussi général que le pétrole : faut-il en peu de pages parler des problèmes politiques qu'il pose, lesquels emplissent les colonnes des journaux plus que jamais depuis juin dernier ? Faut-il situer le pétrole parmi les formes d'énergie concurrentes ? Faut-il se livrer à une description détaillée de réalisations récentes, souvent décrites par ailleurs ?..

J'ai pensé me tirer de cet embarras en essayant de dégager, presque à bâtons rompus, quelques traits importants, sinon caractéristiques, de l'industrie pétrolière, traits de nature à en éclairer les tendances, le comportement, la politique. Naturellement, de tels propos manqueront peut-être d'originalité aux yeux des lecteurs les plus au fait des problèmes énergétiques ; peut-être aideront-ils un peu les lecteurs moins spécialisés — mais qui sont tous d'une manière ou d'une autre en contact professionnel avec « les pétroliers » — à mieux en comprendre les problèmes, à apercevoir de quelque sorte « de l'intérieur » une industrie que l'on a parfois considérée dans un certain sens comme volontiers secrète.

L'importance grandissante du pétrole comme source d'énergie est un phénomène mondial qui ne connaît pas d'exception. Le chiffre record d'un milliard et demi de tonnes produites en 1966 a été très largement dépassé en 1967 : 1,75 milliard de tonnes, soit une augmentation de 7%. La consommation française de 56 millions de tonnes environ à la même date progresse rapidement à un taux de l'ordre de 13%. La seule augmentation annuelle correspondante, soit près de 7 millions de tonnes, est presque égale à la totalité de la consommation intérieure française de 1938.

La part qu'occupent les produits pétroliers parmi les autres sources d'énergie ne cesse également de croître. Lors de la première crise de Suez, en 1956, le pétrole fournissait 30% de la consommation française d'énergie ; au moment de la seconde fermeture du canal, en 1967, c'est plus de la moitié de ses ressources énergétiques que notre pays demande aux produits pétroliers. Encore ces chiffres seraient-ils plus importants si l'on ajoutait aux ressources issues du traitement du brut les ressources tirées du gaz naturel.

Quant à expliquer les raisons de cette irrésistible ascension, il n'y a guère de doute qu'elle provient des qualités propres du pétrole : valeur énergétique élevée pour un faible volume : une tonne de pétrole brut équivaut, en valeur énergétique, à 1,4 tonne de charbon ; facilité de transport et de stockage du fait qu'il s'agit d'un liquide ; com-

(1) ELF UNION, antérieurement UNION GENERALE DES PETROLES, constitue maintenant la branche raffinage-distribution du Groupe pétrolier ELF-ERAP.

plexité chimique du pétrole brut, mélange de nombreux hydrocarbures, susceptible, au prix d'un effort soutenu et permanent d'innovation technique, de multiples applications, et d'une adaptation vraiment extraordinaire aux besoins, spontanés ou suscités, du marché. Ce dernier point est peut-être le plus important : l'exemple classique est celui du pétrole lampant, qui après avoir supplanté les huiles animales et végétales dans le domaine de l'éclairage, était devenu sans objet dans les pays industrialisés, obligeant les raffineurs à modifier profondément techniques et réglages de leurs installations pour produire plus d'essence et plus de fuel ; jusqu'au jour où le réacteur remplaçant dans l'aviation peu à peu le moteur à pistons, le lampant, rebaptisé carburacteur, a dû être à nouveau produit en grandes quantités. Il n'est pas jusqu'aux « impuretés » contenues dans les hydrocarbures liquides ou gazeux que la technique n'ait permis d'utiliser. La production de soufre à partir du gaz de Lacq en est un exemple spectaculaire : on sait que le chiffre d'affaires Soufre de la SOCIÉTÉ NATIONALE DES PÉTROLES D'AQUITAINE est devenu presque égal à son chiffre d'affaires Gaz.

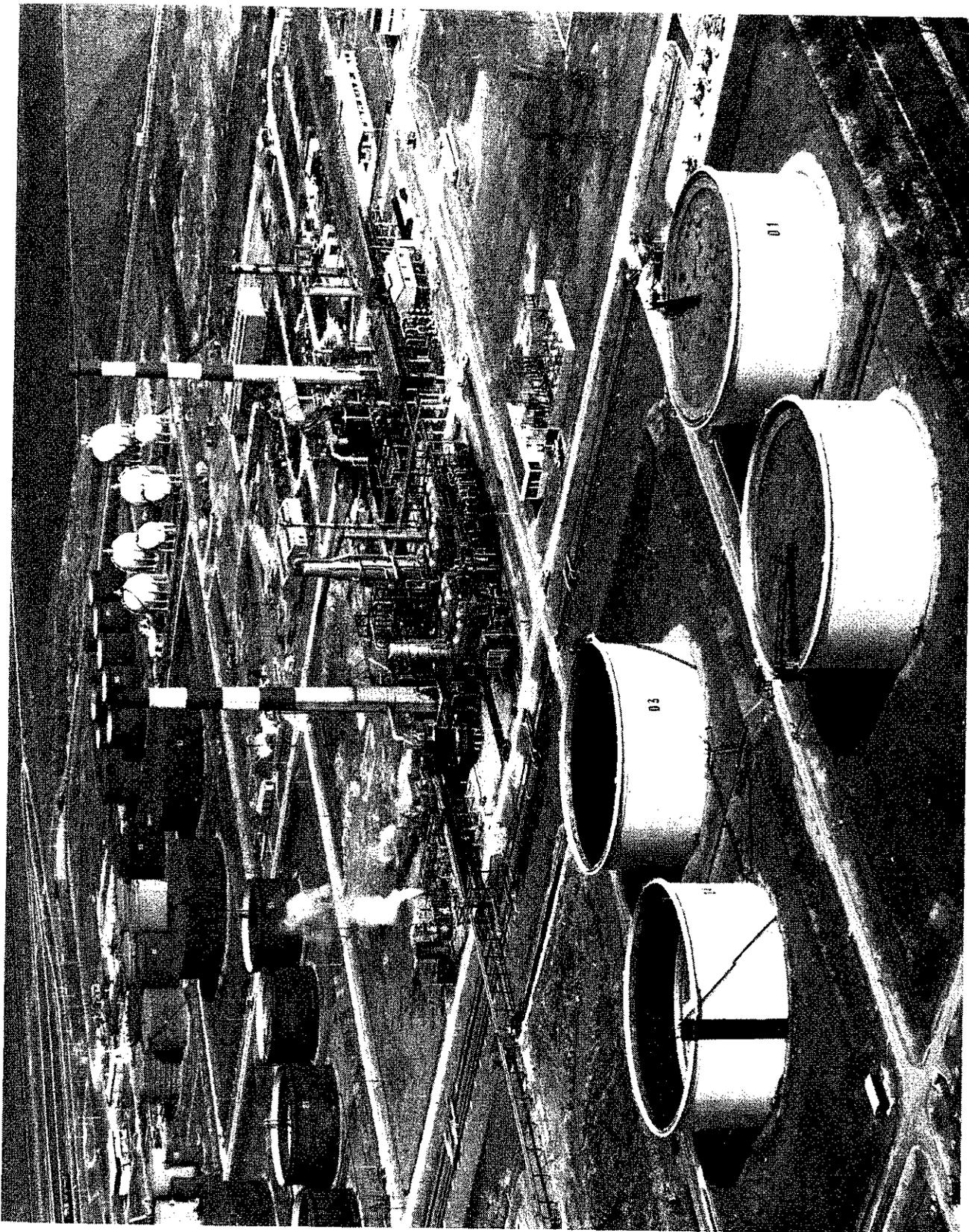
Les traits majeurs de l'industrie pétrolière résultent directement de cette importance universelle et toujours grandissante des produits pétroliers. Produit de grande consommation objet d'une demande incessante, le pétrole doit être produit, transporté, façonné et distribué en grandes quantités. L'industrie pétrolière est donc avant tout une industrie de masse, habituée à compter les tonnes par millions et les mètres cubes de gaz par milliards. Au niveau du consommateur, cela veut dire que là où le français consomme 14 millions de tonnes de blé, 8 millions de tonnes de pommes de terre et 6 millions de tonnes de vin chaque année, il consommera la même année 57 millions de tonnes de produits pétroliers. Industrie de masse, cela veut dire aussi que le poids total des produits pétroliers raffinés en France en 1967 a été de 69 millions de tonnes en face de 50 millions de tonnes de houille.

Le second trait de l'industrie pétrolière, c'est qu'il s'agit d'une industrie de transport. Sans doute donne-t-on souvent la primeur, affectivement sinon techniquement, aux activités de recherche et de production, de raffinage et de pétrochimie. Pourtant, beaucoup plus que les autres sources d'énergie, le pétrole est un produit qui voyage : il le peut facilement mais aussi il le doit du fait de la répartition géographique très différente (hormis les U.S.A. et l'U.R.S.S.) des zones de production et de consommation. On rappellera son itinéraire : oléoducs du champ de production jusqu'au terminal côtier, pétrolier du terminal au port de déchargement, oléoduc de ce port jusqu'à la raffinerie, conduites, camions, wagons ou chalands de la raffinerie jusqu'au consommateur.

C'est la maîtrise des instruments de transport qui a jadis constitué la base de l'empire de Rockefeller ; c'est elle qui a contribué à la création du Groupe Royal Dutch Shell dont l'une des sociétés constitutives s'appelait et s'appelle toujours « SHELL TRANSPORT AND TRADING ». Il faut à ce sujet se rappeler que dans la valeur hors taxes moyenne d'un produit pétrolier fini, livré au consommateur, la part du transport, bien sûr très variable, peut atteindre 35% contre 15% pour les frais de fabrication en raffinerie.

Les chiffres expriment ce double aspect d'industrie de masse et d'industrie de transport. Dans le trafic total des ports français, la part des mouvements de produits pétroliers représente 70%. Quant au trafic des oléoducs, on citera deux exemples : la SOPEG vient de fêter cette année, après 8 ans de service, le passage de la 100 millionième tonne de brut dans l'oléoduc Messaoud-Bougie ; de son côté, le Pipe Line Sud Européen a également transporté depuis sa mise en service début 1963 100 millions de tonnes.

Utilisatrice de gros tonnages de matières premières, productrice de gros tonnages de produits finis, l'industrie pétrolière est une industrie lourde exigeant de gros moyens financiers. Pour donner un ordre de grandeur, un forage terrestre à 4.000 m. de profondeur coûte entre 4 et 6 millions de francs lourds, et deux à trois fois plus s'il s'agit d'un forage en mer. Un pétrolier de 240.000 tonnes vaut environ 80 millions de francs, une raffinerie classique de taille moyenne (3 millions de tonnes/an) entre 200 et 250 millions de francs, ces derniers chiffres représentant également le coût d'une grosse unité pétrochimique de base (steam cracking produisant à partir d'essence 300.000 tonnes/an d'éthylène, ainsi que de nombreux autres « grands intermédiaires » chimiques.



*La raffinerie de l'Île-de-France. — GRANDPURTS (Seine-et-Marne).
Vue générale des installations. Au premier plan les stockages de brut.
Photothèque ERAP-ELF. - Photo Raoul Foulon.*

Mais cette industrie de masse est encore une industrie de croissance rapide, vouée de ce fait à un effort soutenu dont l'échelle absolue devient impressionnante, que l'on considère la profession globalement ou ce que chaque entreprise doit faire pour garder sa position. En France, on l'a vu, l'augmentation de la consommation d'une année sur l'autre dépasse maintenant la consommation annuelle d'avant la seconde guerre mondiale. Chaque année il doit se construire sur notre sol l'équivalent de deux raffineries moyennes, le pétrole nécessaire à leur approvisionnement représente la moitié de la production totale du gisement d'Hassi-Messaoud, dont il faudrait, par conséquent, découvrir l'équivalent tous les deux ans.

A cet effort en tonnage s'ajoute un considérable effort d'innovation, dans tous les domaines. Certains sont spectaculaires et bien connus, qu'il s'agisse du développement des recherches sous-marines, avec leur cortège de techniques et de matériels entièrement nouveaux, ou de l'expansion brutale de la production de bases chimiques à partir de produits pétroliers, dans des unités intégrées dont le chiffre d'affaires atteint ou dépasse un demi-million de francs (actuels) par jour. Bien d'autres secteurs, moins en vedette peut-être, sont le siège d'efforts et d'investissements importants : amélioration de la récupération « secondaire » des gisements, développement de l'automatisation industrielle ou administrative...

L'addition de ces facteurs, quantitatifs ou qualitatifs, conduit l'industrie pétrolière à des taux d'investissement très élevés : les immobilisations nettes au bilan sont couramment de l'ordre du chiffre d'affaires annuel — les investissements nouveaux de l'ordre de 15 à 20% du même chiffre — voire beaucoup plus dans le cas de sociétés en croissance rapide. A titre d'exemple, l'examen du bilan consolidé à fin 1965 du Groupe STANDARD OIL OF NEW-JERSEY (ESSO) fournit les chiffres approximatifs suivants :

Chiffre d'affaires	12,7	milliards de dollars
Valeurs immobilisées	8,5	» »
Investissements nouveaux	1,2	» »
Amortissements	0,7	» »

On peut même tenter de chiffrer l'effort financier correspondant à la tranche annuelle d'accroissement de la consommation française, accroissement qui a été, rappelons-le, de 7 millions de tonnes entre 1966 et 1967. En retenant un chiffre moyen de 100 dollars, soit 500 F/tonne-an nouvelle, reparti pour moitié entre l'« amont » (recherche - production - transport du brut) et l'« aval » (raffinage - distribution), on aboutit aux ordres de grandeur suivants :

— Investissements raffinage - distribution :
 $250 \text{ F/tonne} \times 7.10^6 = 1,8 \text{ à } 2 \text{ milliards de francs.}$

— Investissements pour développement des ressources en brut :
 chiffre du même ordre,
 soit au total 3,5 à 4 milliards de francs. A l'échelle mondiale, les mêmes ratios conduisent à un investissement annuel compris entre 10 et 20 milliards de dollars.

Pour faire face à ces exigences, l'industrie pétrolière se doit d'être une industrie de haute productivité. Il est vrai que le pétrole est un liquide qui permet des manutentions à la fois souples et automatisées. Une des caractéristiques bien connues de l'industrie pétrolière est le petit nombre de personnes qu'elle emploie, du moins directement : une raffinerie moyenne emploie environ 300 personnes, 400 compte tenu des sous-traitances ou prestations de service quasi-permanentes, représentant à peu près 20% de l'ensemble de ses charges. Ce pourcentage tombe nettement en-dessous de 10% pour un pipeline important, un gros navire pétrolier. Il reste, bien sûr, plus élevé en aval, dans la distribution, sans dépasser cependant 30%.

Pour une grande part, c'est par l'accroissement de la taille de ses diverses installations, qui permettent avec un personnel sensiblement identique, de doubler ou de tripler le rapport personnel/tonnage produit, que l'industrie pétrolière parvient à être compétitive. Le « gigantisme », qu'il s'agisse du diamètre des oléoducs, des navires pétroliers ou des raffineries, n'est pas une « manie » des pétroliers ; c'est, dans de larges limites, une obligation pour toute entreprise pétrolière, acculée à produire sans cesse au moindre prix pour faire face à la double concurrence des entreprises pétrolières

rivales et des autres sources d'énergie, et, pour dégager, grâce à une limitation de ses charges d'exploitation, le maximum de capitaux ré-investissables (cash-flow).

En définitive, l'industrie pétrolière est par excellence une industrie d'investissements, de capitaux. Divers chiffres, en valeur absolue, l'ont illustré. On l'illustrera également en considérant les amortissements, qui ne peuvent être choisis longs dans un secteur où les techniques, les « échelles » évoluent vite, et où le risque d'obsolescence est grand : un navire s'amortit en 12 ans, guère plus ; une grosse unité de raffinage en 8 ans, 10 au maximum.

On voit donc comme le pétrole, gros consommateur de capitaux, est aussi régénérateur, à un taux élevé, de cash-flow à réinvestir. En évoquant à ce stade l'importance, évidente et considérable, de la recherche et des techniques, on comprend combien s'applique à notre industrie la notion de « cross-fertilization » vulgarisée par « Le Défi Américain » de M. J.-J. Servan-Schreiber, et combien fondamental est le rôle des centres de décision qui contrôlent tout Groupe pétrolier, élaborent les « projets de mariage » de capitaux engendrés notamment dans un pays X avec des techniques mises au point largement dans un pays Y, en vue de l'attaque d'un marché Z. Ainsi se dégage le poids économique et proprement politique de l'industrie pétrolière. Encore faut-il, pour mieux le percevoir, évoquer à côté des éléments précédents, propres à toute industrie lourde en développement (par exemple la Chimie), un facteur plus spécifique du pétrole, et qui concourt puissamment à la concentration des activités, des entreprises et des décisions.. S'il y a, dans un Groupe pétrolier comme ailleurs, solidarité des capitaux, des techniques — et, bien sûr, des hommes — il y a d'abord solidarité physique, unicité de la matière de base : le pétrole. Bien sûr, de nombreux échanges, des accords multiples existent à tous les niveaux. Mais, fondamentalement, le succès d'un Groupe pétrolier dépend, au-delà de la qualité élémentaire de ses actions à chaque stade, de l'équilibre qu'il réussit à atteindre et à améliorer entre l'amont et l'aval, la ressource et le débouché. Un excédent ou un déficit coûte cher — et ce d'autant plus que leur fatalité apparaît à plus court terme. La mauvaise localisation d'un marché par rapport à un gisement, s'il ne peut y être obvié par voie d'échanges ou d'accords, coûte cher. D'où la tendance des Groupes pétroliers — du moins des plus grands d'entre eux — à une sorte d'universalité, à la disposition de claviers aussi larges que possible facilitant une adaptation continue — une « synergie » — plus profitable des ressources et des débouchés, ceci naturellement sur un plan entièrement internationalisé, sauf contraintes résultant des lois ou règlements propres à chaque pays, et plus spécialement de la fiscalité.

*

Ces quelques remarques ne prétendaient pas à dessiner le portrait — bien plus complexe — de l'industrie pétrolière actuelle ; limitées volontairement aux considérations strictement économiques, elles n'abordent pas les aspects proprement politiques et stratégiques, si fondamentaux dans cette industrie et qui ont été largement développés par des plumes plus autorisées que la mienne.

Peut-être cependant le « portrait-robot » qui a été esquissé, pour schématique qu'il soit, dégage-t-il certaines des données objectives permanentes qui sous-tendent les politiques des Sociétés et des Etats.

Au niveau de la concurrence et des marchés, par exemple, on rappellera le processus accéléré de concentration, à partir du contrôle des moyens d'échange — et plus spécialement des pipelines — engagé par Rockefeller aux U.S.A. à la fin du siècle dernier, processus qui devait, par réaction contre le gigantisme conduisant à un monopole de fait, provoquer le vote de la loi anti-trust (Sherman Act), et le démembrement de l'omniprésente STANDARD OIL en de multiples sociétés dont ESSO (Standard Oil of New-Jersey), MOBIL (ex So-Co-Ny, Standard Oil of New York), et la Standard Oil of California, pour ne citer que les trois figurant traditionnellement parmi les « 7 Grands » du Pétrole.

Au niveau international on indiquera que 80, voire 90% du pétrole mondial est intégré, c'est-à-dire circule au sein de Groupes internationaux du gisement au consommateur.

Mais les considérations qui précèdent méritent également d'être rapprochées de la politique pétrolière française, dont on connaît la remarquable continuité depuis un demi-siècle, dans des conjonctures et sous des régimes bien différents. Cette continuité en effet, ne s'explique que par la permanence de ses motivations, qu'on les exprime en termes politiques, voire stratégiques, ou en termes de balance des comptes, d'indépendance et de développement économiques — deux visages d'une seule et même réalité. Au fond, cette politique tend simplement à affirmer dans les actes qu'une collectivité — la France en l'occurrence — ne peut se désintéresser, ou se laisser déposséder d'une industrie puissante, riche d'effets induits, au taux de renouvellement élevé, et dont la croissance au sein de ladite collectivité est précisément la conséquence du développement économique de cette collectivité, de son accroissement continu en tant que consommateur actuel et potentiel.

Ce serait bien en effet un abandon irréversible pour une collectivité — France aujourd'hui, Europe demain, espérons-le — que de laisser l'industrie pétrolière qui la sert évoluer sous la seule impulsion des tendances « internationalistes » qui ont été décrites.

Faits porteurs des avènements possibles de l'énergie électrique

par **P. AILLERET**, Conseiller Scientifique et Technique de l'E.D.F.

L'électricité n'est qu'une forme d'énergie qui concourt avec les produits pétroliers, le charbon et le gaz, à satisfaire les besoins des usagers. Mais d'autre part elle provient pour une fraction actuellement croissante des mêmes combustibles, le reste venant de l'hydraulique pour une part qui entre en régression.

Les centrales électriques constituent ainsi un champ de substitution qui permet de définir une commune mesure économique entre les kWh d'origine hydraulique et les calories des combustibles, et de compter l'énergie en T.E.C., c'est-à-dire en tonnes d'équivalent charbon.

Avant de préciser la situation actuelle et prochaine, signalons que tout ceci pourra changer plus tard, qu'il est possible par exemple qu'un jour les centrales nouvelles soient toutes nucléaires, auquel cas on ne pourra plus établir de commune mesure entre les différentes formes d'énergie sur la base des substitutions dans l'alimentation des centrales électriques ; nous y reviendrons plus loin.

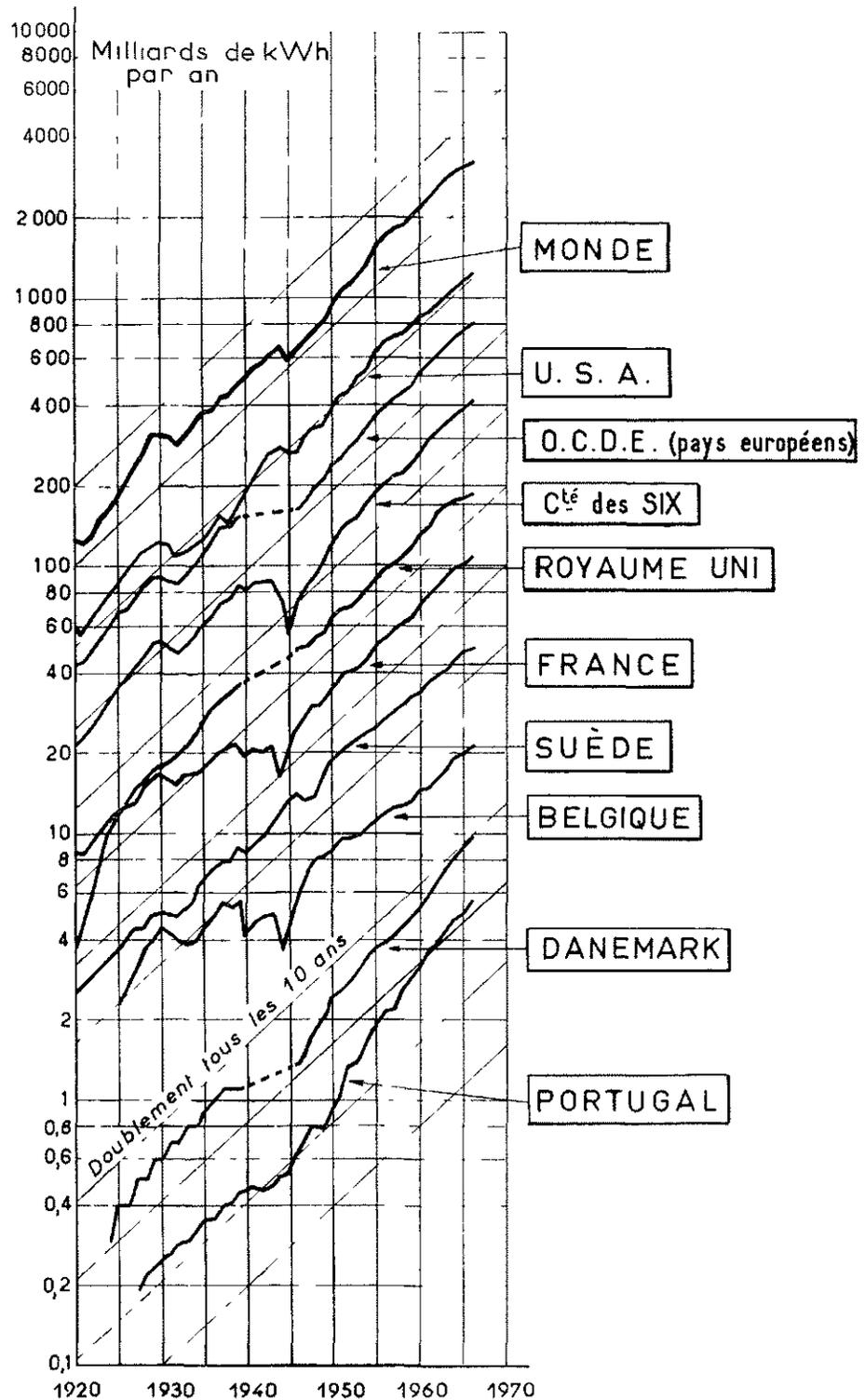
L'EXPANSION DE LA DEMANDE D'ENERGIE ELECTRIQUE

Tout le monde sait que la consommation d'électricité des pays développés a tendance à croître exponentiellement à une allure de l'ordre du doublement tous les dix ans.

Ce n'est pas la seule consommation dans ce cas : le carburant pour la circulation routière a pour le moment à peu près la même allure de développement.

Mais le phénomène est plus ancien, et il est peut-être plus durable, pour l'électricité dont la polyvalence éloigne sans cesse la saturation du fait que les usages se relayent les uns les autres. L'éclairage, les tramways, les chemins de fer ont été successivement les facteurs principaux de développement qui se sont assez heureusement relayés les uns les autres pour aboutir à la croissance étonnamment régulière à laquelle nous sommes habitués, trop habitués peut-être maintenant, car nous pouvons avoir tendance à surestimer le terme jusqu'auquel l'extrapolation restera valable.

UNE CINQUANTAINE D'ANNÉES DE DÉVELOPPEMENT
DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ
DANS DIVERS PAYS



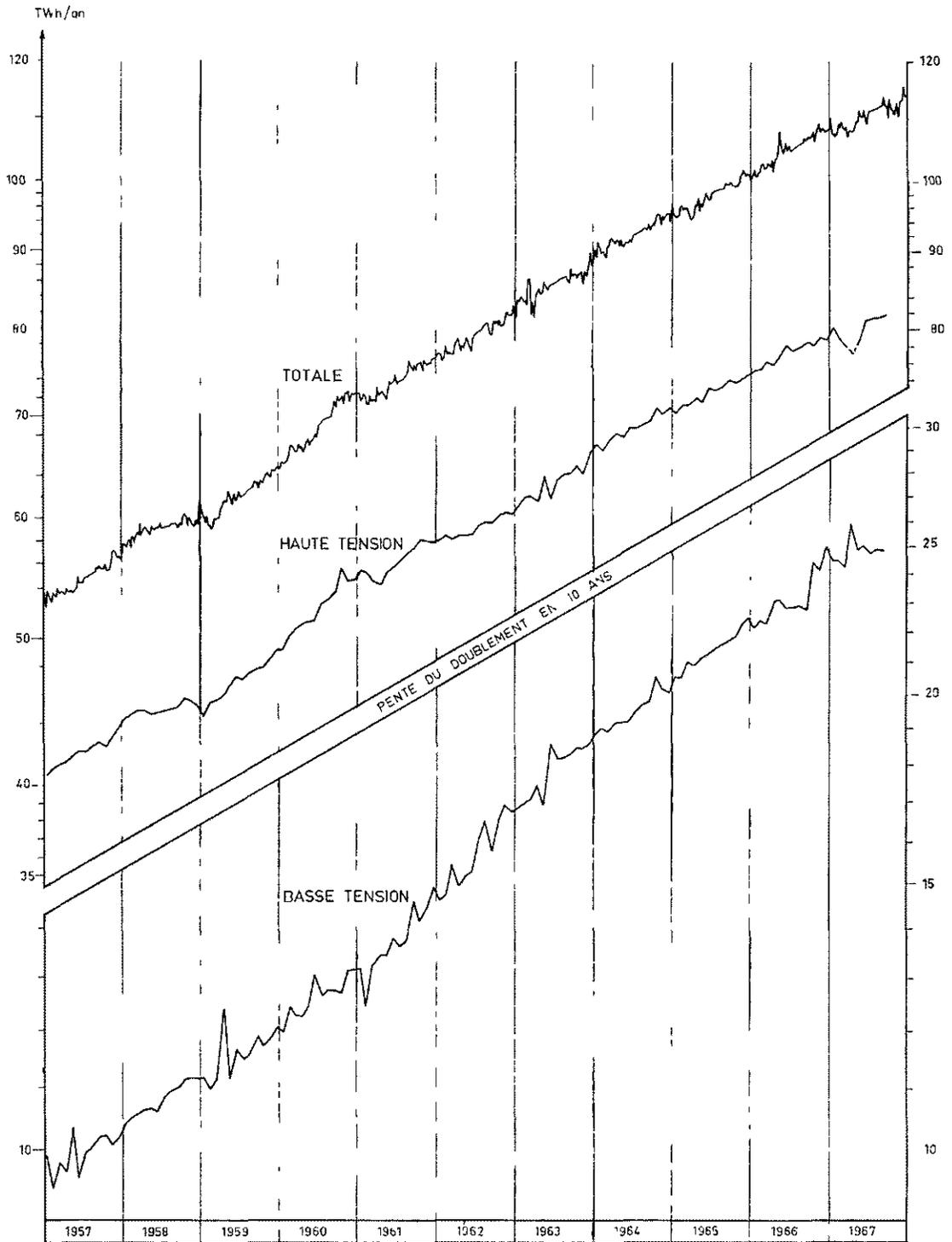


FIG. 2

Analyse plus fine de l'évolution de la consommation d'électricité dans la dernière décennie. Valeurs désaisonnalisées. Séparation entre usages haute tension et usages basse tension.

RÉPARTITION DES CONSOMMATIONS D'ÉLECTRICITÉ 1966

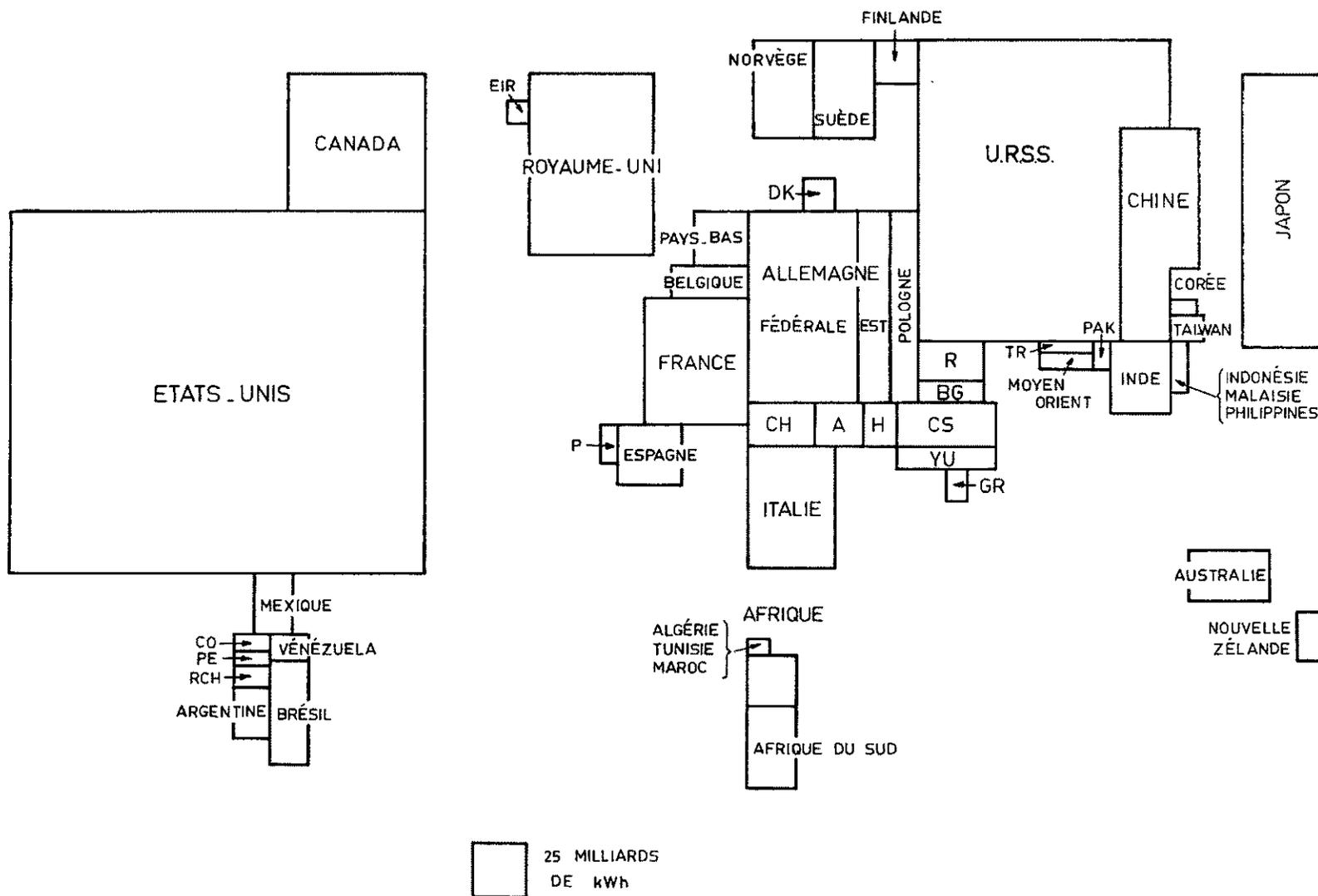


FIG. 3

A l'échelle de la dizaine d'années notre confiance dans ce développement est étayée par le fait que des pays qui ont une consommation par habitant plus élevée que nous, les Etats-Unis, la Suisse, la Suède et la Norvège par exemple, conservent la même allure du doublement tous les dix ans.

Cette tendance est commune à tous les pays développés. De plus, ceux qui ne le sont pas encore ont des taux de croissance des consommations électriques deux ou trois fois plus élevées mais qui se replient vers le taux de 7% par an au fur et à mesure que la consommation par habitant de ces pays tend à rejoindre asymptotiquement celle des pays développés. Ainsi les pays ne se dépassent pas dans cette course :

La consommation par habitant en France suit avec un retard assez constant de 18 ans celle des Etats-Unis.

L'Italie suit la France avec 4 ans de décalage.

L'Espagne suit l'Italie avec un décalage de 6 ans qui tend, il est vrai, à se réduire lentement.

C'est seulement dans les pays sensiblement moins développés que le décalage en temps par rapport aux pays plus développés diminue assez vite, mais de moins en moins vite, en paraissant tendre vers une limite.

On notera en passant l'importance de ces décalages en temps : les consommations électriques par habitant sont très variables suivant le développement des pays, et la carte ci-jointe où chaque pays est représenté par une surface proportionnelle à sa consommation d'électricité diffère beaucoup non seulement d'une carte ordinaire, mais même d'une carte dont les surfaces sont proportionnelles aux populations.

Ces comparaisons géographiques nous rassurent sur la possibilité d'extrapoler les taux de développement de l'électricité pour les dix prochaines années. Les légères irrégularités que l'on constate d'une année à l'autre dans cette croissance pour chacun des pays développés au cours des 20 dernières années permettent d'estimer l'écart type affectant la prévision, à l'échelle des 5 années, nécessaire pour l'équipement des moyens de production nouveaux.

Mais comment se rendre compte de l'aléa des prévisions à plus longue échéance, moins directement nécessaires, mais cependant utiles pour situer le cadre des projets actuels dans une perspective beaucoup plus lointaine ? Pour sentir combien le problème est différent de l'appréciation des aléas à 5 ans il faut considérer les usages qui pourraient servir de relais importants à la saturation qui atteindra inévitablement les usages actuels.

Il en existe deux qui pourraient éventuellement mettre en jeu des quantités considérables d'énergie : le chauffage électrique et la voiture à accumulateur.

En effet le chauffage des locaux absorbe actuellement en France autant d'énergie primaire qu'en représente la totalité de la consommation électrique ; la circulation routière absorbe une énergie qui en représente encore les 40% et qui est en développement rapide. Il suffit de se rendre compte que le succès de chacun de ces usages est possible mais aléatoire pour démontrer que le taux de croissance de la consommation d'électricité est grévé d'aléas assez forts à l'échelle des temps de développement, en cas de succès, du chauffage électrique ou de la voiture à accumulateur, temps qui sont de l'ordre de grandeur de la vingtaine d'année.

Le cas du chauffage électrique.

Le chauffage électrique est en concurrence avec le chauffage au gaz et surtout avec le chauffage au fuel domestique.

Les conditions de cette concurrence sont encore mal connues car le chauffage électrique comporte plusieurs variantes : chauffage direct, soit par les plinthes chauffantes

très utilisées aux Etats-Unis, soit par le plafond chauffant qui s'y développe maintenant et qui supprime tout encombrement par appareil de chauffage ; chauffage à accumulation soit par les planchers, soit par des poêles, soit par accumulation centrale ; chauffage hors pointe, etc...

Ces techniques sont seulement en train de se préciser ; plusieurs subsisteront, répondant à des cas différents ; beaucoup disparaîtront.

Mais l'élément d'évolution qui permet le plus difficilement de prévoir l'avenir de l'électricité dans ce domaine réside dans l'évolution possible des besoins de chauffage.

Sans doute on s'habitue à des températures de plus en plus élevées ; ce mouvement n'est peut-être pas sans inconvénient pour la santé sinon des habitants adultes, du moins de leur descendance, mais il paraît irréversible.

Cependant l'évolution des températures de chauffage de 20 vers 24 degrés n'augmentera pas d'un grand pourcentage les moyens de chauffage nécessaires dans les climats où les températures extérieures d'hiver sont considérablement au-dessous de ces chiffres.

Par contre deux autres évolutions sont possibles qui pourraient même faire disparaître à terme les besoins de chauffage.

D'une part les maisons tendent à être mieux isolées, même lorsqu'on ne recherche pas un surisolement systématique en vue du chauffage électrique en profitant de ce que son coût d'installation est moins élevé que celui d'un chauffage au fuel. Ceci tient à une amélioration des techniques et des produits d'isolation ainsi qu'au souci d'isolation phonique qui influe sur l'isolation thermique, bien que les deux problèmes ne soient pas complètement parallèles.

Il est probable aussi que l'on arrivera à rationaliser les renouvellements d'air qui sont actuellement ridiculement surabondants dès que le vent favorise les circulations d'air des fuites amont vers les fuites aval des bâtiments ou, ce qui est économiquement pire, dès qu'il fait très froid et que s'accroissent, proportionnellement à l'écart des températures, les circulations par thermosiphon entre étages différents et même entre fuites au haut et fuites au bas des portes et des fenêtres.

D'autre part, ce qui est plus important encore, c'est que les dégagements de chaleur à l'intérieur des locaux augmentent d'année en année : l'éclairage, la cuisine, les appareils électrodomestiques de tous genres, la consommation d'eau chaude dont une partie seulement des calories est perdue dans l'égout, dégagent dans l'habitation des quantités de chaleur qui croissent d'année en année à la cadence du doublement tous les 6 ou 7 ans.

En Suède déjà certaines maisons bien isolées, très bien éclairées et où les consommations d'eau chaude se sont beaucoup développées, n'ont presque plus besoin d'être chauffées aux heures où la maisonnée est active.

C'est au contraire l'évacuation de la chaleur dégagée par des éclairages se rapprochant de plus en plus de l'éclairage naturel qui commence à poser des problèmes. De même en Amérique le conditionnement de l'air que l'on croyait autrefois devoir rester limité aux régions les plus chaudes remonte maintenant jusqu'au Canada.

Le chauffage électrique devient imbattable économiquement si dans les 24 heures du jour le plus froid il suffit, pour chauffer la maison, de régulariser sa consommation électrique au niveau qui correspond à la pointe des usages autres que le chauffage. En effet le chauffage électrique ne nécessite plus alors les mêmes investissements qu'il appelle actuellement d'une part en capacités supplémentaires des branchements et des réseaux, d'autre part soit en moyens de production supplémentaires aux heures de forte charge, soit en moyens d'accumulation de la chaleur.

Si l'on ajoute à cela les avantages indirects du chauffage électrique, on voit que tout est envisageable dans ce domaine : qu'il prenne totalement le marché des installa-

tions de chauffage dans dix ans est tout à fait possible, comme il peut au contraire végéter devant la concurrence des chauffages au fuel et au gaz.

Sans doute la politique commerciale des Electriciens peut jouer un rôle, mais assez limité quand il s'agit de développement à long terme, car, sous peine de créer des distorsions économiques, le prix de vente de l'énergie pour le chauffage ne peut s'écarter beaucoup du coût marginal qui résulte essentiellement du système même de chauffage.

Le cas de la voiture électrique.

Des aléas plus grands encore se rencontrent dans le cas de la voiture électrique.

Un progrès très réel des accumulateurs, joint à la crainte de la pollution atmosphérique (ou à la surcharge économique que représenterait pour la voiture à carburant une épuration sérieuse de l'échappement) pourrait donner à l'énergie électrique un débouché très important dans la recharge des accumulateurs.

Un progrès majeur des accumulateurs est possible, mais on ne peut compter sur lui avec certitude, alors que les recherches très nombreuses faites depuis Planté n'ont jamais découvert de principe d'accumulateur qui surclasse l'accumulateur au plomb, sauf pour des applications très particulières.

Les progrès techniques s'accroissent et nous avons tendance à croire — peut-être trop — qu'il suffit de consacrer suffisamment d'argent à un problème pour qu'une solution apparaisse. C'est pourquoi le succès de l'automobile à accumulateur n'est aucunement exclu.

Mais en sens inverse l'accumulateur peut ne faire que des progrès trop lents en comparaison de ceux des moteurs à carburant : c'est ce qui a été le cas dans le passé puisque la voiture électrique était compétitive en 1900 et ne l'est plus aujourd'hui.

On peut aussi imaginer que les piles à combustibles fassent encore beaucoup plus de progrès que les accumulateurs et qu'un véhicule à piles à combustible surclasse un jour économiquement le véhicule à accumulateur (il en est loin actuellement), auquel cas le marché de la circulation routière serait aussi perdu pour l'électricité.

Voilà donc encore une seconde très grande application possible de l'électricité dont on ne peut pas savoir aujourd'hui si elle débouchera ou non.

On ne voit guère d'autre application pouvant mettre en jeu des quantités d'électricité comparables à ce qui pourrait résulter du chauffage électrique ou du véhicule à accumulateur.

On ne peut donc pas dire que la loi des grands nombres jouera comme cela peut être le cas pour la somme des consommations d'industries variées.

Nous avons donc bien dans ces deux cas la preuve que les aléas dans le taux de croissance de la consommation sont grands à l'échelle du temps de développement de ces grandes applications possibles c'est-à-dire à l'échelle de la vingtaine d'années. Entre ce qui se passera si tous deux réussissent et ce qui se passera si aucun ne débouche, l'écart est important.

LES SOURCES D'ENERGIE ELECTRIQUE

Fort heureusement les aléas sont assez limités à cinq ans de distance et c'est l'essentiel puisque tel est le délai au-dessous duquel il n'est plus temps de renforcer l'équipement pour faire face à un changement de l'objectif de consommation.

Quant à l'importance des équipements nouveaux, elle ressort clairement de ce que, la consommation doublant en 10 ans, nous devons installer dans les 10 prochaines années

une puissance équivalente à celle qui est actuellement en service, majorée des renouvellements.

En ce qui concerne les sources d'énergie, l'hydraulique, qui intervenait depuis le début du siècle jusqu'assez récemment pour la moitié de nos productions nouvelles, ne jouera plus dans l'avenir qu'un rôle bien limité du fait du degré d'avancement déjà atteint dans l'équipement de nos ressources naturelles ainsi d'ailleurs que du fait de la hausse du taux d'intérêt, de la baisse des prix du fuel, et de l'arrivée de l'énergie nucléaire.

L'énergie nucléaire arrive à la compétitivité 2 5ans après la divergence de la première pile réalisée à Chicago par Enrico Fermi.

Il avait été vite vérifié qu'il pouvait en sortir des explosions nucléaires et l'opinion publique a tout de suite eu confiance qu'il en sortirait aussi de l'énergie économique. A vrai dire elle a eu aussi, un peu plus tard, l'impression que la fusion des atomes légers donnerait assez rapidement de l'énergie encore meilleur marché mais ceci est encore extrêmement loin de se préciser. On pouvait également penser, à non moins juste titre a priori, que la chimie serait transformée par les progrès du nucléaire et que des procédés nouveaux bouleverseraient les réactions entre molécules ; il n'en est cependant sorti que des applications d'une envergure et d'un intérêt bien limités. Ceci confirme qu'il faut se méfier de la tendance à attribuer à toute découverte une prédestination à déboucher économiquement dans le genre d'activité dont on se préoccupe à l'époque.

Dans le cas du nucléaire, son aptitude à produire économiquement de l'énergie qui avait fait l'objet d'annonces prématurées, en particulier à la première Conférence de Genève en 1955, est au contraire apparue à juste titre comme proche lors de la troisième Conférence de Genève en 1964.

Effectivement aujourd'hui le prix de revient du nucléaire dans les grandes centrales de base descend quelque peu au-dessous du prix de revient des centrales à charbon et à fuel, sauf au voisinage de mines très économiques ou dans la mesure où il s'agit d'utiliser sur place les produits lourds des raffineries.

L'énergie nucléaire se développe d'une manière en quelque sorte explosive aux Etats-Unis et, à part dans certaines régions minières, elle va bientôt y faire face à elle seule à la presque totalité des besoins nouveaux d'énergie électrique.

Il semble bien que plusieurs pays d'Europe soient en train de partir dans la même voie.

On sait qu'en France le problème des filières a donné lieu ces temps derniers à beaucoup de discussions au cours desquelles ont été mis en avant les avantages, d'une part des réacteurs uranium naturel-graphite-gaz, d'autre part des réacteurs à eau ordinaire et uranium enrichi à 2 ou 3%

Au point de vue du ravitaillement en matières premières, la filière à uranium naturel a l'avantage d'utiliser un métal dont nous détenons des ressources importantes et pour lequel il existera de plus en plus un marché mondial étant donné le grand nombre des ressources minières que l'on découvre chaque année.

Au contraire l'uranium enrichi exige une usine de séparation isotopique qui implique des investissements considérables auxquels s'ajoutent ceux des centrales qui lui fournissent sa force motrice. Une telle usine n'est économique que si elle est très grande et par suite si elle alimente un nombre très important de centrales électriques. Il serait donc ruineux de construire une usine de fabrication d'uranium faiblement enrichi en même temps qu'on commencerait à développer les centrales du type correspondant. Il faut d'abord nécessairement développer les centrales en important de l'uranium enrichi et l'usine de séparation isotopique ne peut être viable que le jour où elle alimente un gros équipement de centrales de ce type.

Dans la phase intermédiaire, il faut bien importer l'uranium enrichi dont les producteurs sont en nombre minime et qui est aussi un produit intermédiaire dans la fabrication de l'uranium très enrichi des armes atomiques.

Quand il ne s'agit que de produire ainsi une faible partie des besoins électriques nationaux cela ne pose que des problèmes politiques de principe, mais quand la partie des besoins électriques ainsi satisfaits devient substantielle, sans que toutefois les quantités d'uranium enrichi soient encore suffisantes pour justifier une usine de séparation isotopique, l'indépendance économique de l'approvisionnement en énergie est mise en cause, un stockage des combustibles étant cependant possible et les consommations pouvant être au besoin réduites en n'utilisant plus qu'aux heures les plus chargées les centrales de ce type que l'on aurait normalement exploitées en base.

Au point de vue industriel la filière à uranium naturel a l'avantage de ne mettre en jeu que des techniques françaises pour lesquelles notre industrie a la plus entière liberté d'exportation, tandis que l'utilisation des réacteurs à eau implique des licences étrangères dont l'industrie met toujours un certain nombre d'années à se dégager. C'est un élément non négligeable pour chacun des deux plateaux de la balance des comptes.

Les perspectives de prix de revient sont naturellement un élément essentiel du choix puisque c'est ce prix qui commandera les conditions d'approvisionnement en électricité de nos industries.

A priori la filière à uranium naturel est plus massive que l'autre, mais met en jeu des matériaux de construction moins nobles. Si l'on tient compte de tous les auxiliaires et de toutes les sécurités nécessaires, les complications paraissent du même ordre.

Elle permet de monter à des températures plus élevées : en ordre de grandeur 400° au lieu de 300°. Cela tend à accroître le rendement thermodynamique, par contre cela ne change pas autant que l'on pourrait croire, le coût de la partie classique de la centrale pour une même puissance électrique.

Les prix de revient dégagés des premières réalisations sont encore affectés d'incertitudes assez larges : les réacteurs à eau, alimentés en uranium enrichi au prix américain semblent un peu moins coûteux de premier établissement tout en ayant à peu près les mêmes charges d'exploitation, les écarts annoncés ne sortant guère de l'ordre de grandeur des incertitudes sur la prévision des prix de revient.

Mais les investissements annuels ne sont pas commandés par le seul prix du kilowatt installé : dans un pays dont la puissance totale de pointe est grande par rapport aux puissances des plus grosses unités ils sont déterminés par le produit de ce coût par le facteur de disponibilité.

Des maladies de jeunesse se rencontrent nécessairement dans la mise en œuvre des techniques entièrement nouvelles arrivées seulement récemment à la phase où il devient raisonnable de faire plusieurs unités identiques au lieu de créer le progrès unité par unité.

Les expériences de disponibilité des diverses filières sont parfois contradictoires dans des pays différents et elles ne sont pas encore significatives étant donné le petit nombre des unités en cause.

L'avenir ne sera pas déterminé uniquement par la vertu propre des filières en cause ; le progrès de chacune d'elles en prix de revient et en disponibilité implique que l'on pousse les réalisations à une cadence suffisante.

La division de l'Europe en marchés peu étendus est évidemment un handicap pour la filière à uranium naturel, mais les aléas d'évolution des prix de revient rendent cependant difficile de prévoir les résultats de cette course entre filières. Les calculs les plus poussés ne permettent pas plus d'en chiffrer les probabilités qu'ils ne sont capables de prévoir l'évolution future des cours relatifs des valeurs mobilières sur un marché boursier.

C'est ce qui explique que deux décisions simultanées viennent d'être prises : on construira à Fessenheim deux unités de 750 MW chacune, à uranium naturel-graphite-gaz, bénéficiant des perspectives du nouveau combustible à âme graphite qui vient d'être mis au point par le Commissariat à l'Énergie Atomique. Ces unités de Fessenheim surclasseront sensiblement en prix de revient les deux unités de 500 MW en construction à Saint-Laurent-des-Eaux et celle identique en construction à Vandellós en Catalogne.

L'Électricité de France participera d'autre part pour moitié à un réacteur à eau pressurisée de 745 MW construit en Belgique à Tihange en collaboration avec les producteurs d'électricité belges suivant une formule réciproque de celle adoptée pour la construction en France à Chooz d'une première centrale franco-belge également du type à eau pressurisée.

Dans un domaine aussi mouvant il est toujours prudent d'attendre que les réalités économiques se précisent avant de s'engager plus qu'il n'est vraiment utile.

Au reste la tendance des prix du fuel, l'éloignement d'une crainte de ralentissement des découvertes de pétrole et la diversification croissante des ressources correspondantes ne font pas une obligation d'entrer immédiatement d'une manière massive dans le nucléaire.

Mais il ne faut pas en conclure qu'un passage presque complet au nucléaire n'apparaîtra pas chez nous comme justifié dans un petit nombre d'années quand les expériences seront économiquement plus significatives et pourront servir de base plus sûre aux décisions.

L'ÉVENTUELLE DIVISION EN DEUX DU SECTEUR ÉNERGÉTIQUE

La possibilité que, dans un petit nombre d'années et dans presque tous les pays développés la quasi totalité des nouvelles centrales électriques soient nucléaires doit nous faire réfléchir à ce que signifieraient en pareil cas nos bilans énergétiques en T.E.C.

Ceux-ci sont basés sur les substitutions que l'on peut faire toutes les fois que se pose un choix, par exemple entre une centrale hydroélectrique et une centrale à charbon : c'est de là que résulte le taux d'équivalence entre le kWh hydroélectrique et la tonne de charbon (400 gr/kWh est la valeur la plus souvent adoptée dans les calculs actuels).

Dans la phase où l'on fait à la fois des centrales à charbon et des centrales nucléaires on peut de même trouver un coefficient d'équivalence entre le charbon, l'uranium naturel à 0,7% d'isotope 235 et l'uranium enrichi à 2 ou 3%.

Mais le jour où l'économie conduira à ne plus produire l'électricité que par des centrales nucléaires ou des centrales hydrauliques très économiques comme on en trouve encore au Canada, en Norvège, en Sibérie ou en Afrique, il n'y aura plus de choix mettant en jeu des valeurs de substitution entre d'une part les combustibles (fuel, charbon, gaz) et d'autre part l'électricité d'origine nucléaire et hydraulique.

Bien entendu le fait qu'on continuera à brûler du fuel et du charbon dans les centrales anciennes n'apportera aucun élément de commune mesure puisqu'aucune substitution n'est possible, faute de pouvoir brûler l'uranium dans les centrales thermiques classiques ou du fuel dans les centrales nucléaires.

De même la loi physique de conversion de l'énergie ne peut servir de base à une équivalence économique. C'est ainsi qu'il aurait été absurde en France de compter le kWh hydroélectrique pour son équivalent calorifique de 860 kilocalories c'est-à-dire 130

grammes de charbon. Cela n'aurait été admissible qu'en Norvège à l'époque où il n'y avait autrefois que des centrales hydrauliques dont une partie de la production passait en chauffage électrique substitué à des chauffages au charbon. Mais il n'en est déjà plus ainsi aujourd'hui en Norvège.

La conversion physique de l'énergie ne permettra pas plus de mettre dans le même bilan énergétique le secteur des combustibles et celui de l'électricité qu'elle ne justifie de faire un bilan unique des produits énergétiques et des produits alimentaires sous prétexte que le blé et le café ont aussi un pouvoir calorifique bien défini, et d'ailleurs très appréciable.

Une commune mesure pourrait être trouvée dans les applications ; ce serait le cas si le chauffage des locaux se partageait entre le chauffage électrique et le chauffage à combustible. Ce serait le cas d'autre part si les progrès des moteurs à combustion interne étaient tels qu'ils puissent redevenir compétitifs avec l'énergie amenée par les réseaux électriques. Mais les coefficients d'équivalence seraient très différents dans ces deux exemples et il est à craindre que les substitutions dans les différents usages ne redonnent pas aux bilans énergétiques globaux la base solide qu'ils avaient dans la production de l'électricité.

La généralisation du nucléaire dans les équipements nouveaux appellera ainsi l'établissement séparé d'un bilan des combustibles et d'un bilan de l'électricité.

L'EFFET DE TAILLE DANS LES UNITÉS DE PRODUCTION

Le succès du nucléaire est lié à l'utilisation des grandes puissances unitaires. Si cette puissance unitaire avait été limitée à 200 MW soit par des contraintes inhérentes au nucléaire, soit par la taille des réseaux, l'énergie nucléaire ne serait pas considérée aujourd'hui comme compétitive.

Sans doute l'effet de taille se rencontre dans tous les moyens de production, mais seulement dans certaines limites de puissance et il se sature pour des puissances très variables suivant la technique dont il s'agit.

Ainsi dans le moteur Diesel l'effet de taille commence à se saturer vers la dizaine de milliers de kilowatts.

Il est à remarquer en passant que le moteur Diesel a fait ces dernières années des progrès économiques remarquables non seulement en coût d'investissement mais aussi en possibilité de brûler les fuels les plus lourds.

Ces progrès profitent beaucoup aux pays peu développés dont les réseaux sont à l'échelle correspondante de puissance. Ainsi ces pays trouvent-ils eux aussi dans les progrès du Diesel obtenus grâce aux recherches industrielles des pays plus développés, un bénéfice symétrique de celui que les progrès de l'atomique, qu'ils ne peuvent pas pour leur part utiliser actuellement, vont apporter aux pays développés eux-mêmes.

Dans les centrales à vapeur classiques l'effet de taille est encore très sensible à l'échelle de 200 Mégawatts. Cet effet se mesure par la dérivée logarithmique du coût d'une unité par rapport à sa puissance, C étant le coût d'une unité de puissance P et $C + dC$ le coût de l'unité de puissance $P + dP$ le rapport $\frac{dP}{P} : \frac{dC}{C}$ caractérise l'effet de taille. Cette dérivée logarithmique du coût par rapport à la puissance est évidemment aussi le rapport du coût marginal $\frac{dC}{dP}$ de la dilatation de puissance d'un groupe à son coût moyen $\frac{C}{P}$.

Sa valeur est de l'ordre de $\frac{2}{3}$ pour des puissances de thermique classique comprise entre 50 et 200 MW, ce qui revient à dire que dans cet intervalle le coût du groupe de puissance P varie comme $P^{2/3}$

Mais au-delà de 200 MW l'effet de taille diminue progressivement. Cela tient en particulier à ce qu'il devient presque nul pour les grandes chaudières quand elles atteignent le gigantisme. Aux environs de 500 ou 600 MW cette dérivée logarithmique pour l'ensemble du groupe n'est plus que de l'ordre de 0,9 : l'effet de taille s'est fortement saturé.

Dans le nucléaire au contraire la dérivée logarithmique du coût par rapport à la puissance paraît bien rester de l'ordre de $\frac{2}{3}$ jusqu'au millier de Mégawatts.

La comparaison entre unités classiques et unités nucléaires change donc encore beaucoup quand on passe d'unités de 500 MW à des unités de 1.000 Mégawatts.

Il est trop tôt pour deviner si les réacteurs monteront allègrement à des puissances encore plus élevées ou si une saturation dans le bénéfice de l'effet de taille viendra freiner cette tendance.

Mais on prévoit généralement aujourd'hui qu'à l'échelle d'une dizaine d'années les réacteurs à neutrons rapides commenceront à jouer un rôle dans la production d'électricité, la cadence de leur développement ultérieur étant commandée par des quantités de plutonium produites par les réacteurs actuels.

Or les puissances par unité de volume dégagées dans ces réacteurs sont extrêmement élevées ce qui rend leur technique plus difficile à mettre au point mais n'est pas défavorable au prix de revient et a des chances de reculer jusqu'à des puissances unitaires très élevées la saturation de l'effet de taille.

Ainsi les techniques peuvent se relayer sans que l'effet de taille perde son actualité.

RÉACTION DU RÉSEAU SUR LA TAILLE DES UNITÉS DE PRODUCTION

La taille des unités présente une contrepartie pour un réseau interconnecté si la charge totale à desservir n'est pas très grande par rapport à la puissance des unités en cause.

Nous reviendrons plus loin sur ce qu'est la puissance réellement interconnectée lorsque de grandes distances sont en cause ; considérons d'abord le cas où le réseau n'est pas trop étendu en surface et où toute centrale peut effectivement porter secours à une autre. Pour fixer les idées c'est le cas d'une île comme la Grande-Bretagne.

Les moyens de production groupés sur un tel réseau doivent faire face avec une sécurité suffisante à la demande des usagers qui s'accroît d'année en année.

Tout le monde a compris aujourd'hui qu'il n'est pas possible de supprimer tout risque de défaillance, car par hasard un grand nombre de centrales peuvent tomber en panne simultanément, mais que la probabilité de défaillance ne doit pas dépasser une valeur déterminée, 3% par an par exemple.

Il y a d'ailleurs un optimum économique pour ce chiffre dans l'intérêt même des usagers : plus on le veut faible, plus on élève le prix de l'énergie ; mais ceci est une autre question.

Pour un pare donné d'unités de production, la probabilité de défaillance globale du réseau se calcule en combinant les risques d'indisponibilité des diverses unités au cours de la période critique d'hiver.

Si pour prendre le cas le plus simple les unités étaient toutes des unités thermiques de puissance très faible par rapport à la demande totale du réseau et affectées chacune d'un coefficient de disponibilité de 90% en hiver, la puissance installée nécessaire serait à peine supérieure aux $\frac{100}{9}$ de la pointe de consommation.

Mais si les plus grosses unités ont une puissance qui est une fraction notable de la puissance totale appelée par les consommateurs, la mauvaise chance peut faire que quelques grosses unités soient en panne simultanément. L'étude des combinaisons possibles de pannes montre que pour conserver la même probabilité de défaillance il faut une puissance installée totale nettement supérieure au produit de la puissance à garantir par l'inverse du coefficient de disponibilité des groupes.

Pour parler un autre langage, le pourcentage de réserves doit s'élever d'autant plus au-dessus de l'inverse du coefficient de disponibilité que le réseau comporte plus d'unités dont la puissance individuelle est une fraction notable de la puissance installée totale.

Cela ne réduit qu'assez légèrement l'avantage économique qu'il y aurait par exemple à équiper des unités de 1.000 MW au lieu d'unités de 500 MW dans un pays dont la pointe est de 20.000 MW comme en France.

Mais cela supprimerait cet avantage dans un pays à l'échelle de la Belgique s'il était exploité isolément.

LA SIGNIFICATION DE L'INTERCONNEXION

On pourrait croire que le problème disparaît lorsqu'il existe une interconnexion à l'échelle d'un continent comme c'est le cas pour l'Europe de l'Ouest ou les Etats-Unis.

Sur ces énormes surfaces où la marche synchrone des alternateurs impose une fréquence unique, les unités en parallèle sont si nombreuses que la puissance des plus grandes d'entre elles est très petite par rapport à la demande totale.

Il est d'ailleurs aujourd'hui techniquement possible d'exploiter un réseau illimité et d'en assurer le réglage fréquence-puissance par régions géographiques sans avoir besoin d'un contrôle général.

Ce synchronisme donne l'impression que le réseau interconnecté forme un tout et qu'une machine quelconque peut porter secours à n'importe quelle machine défaillante.

La vérité est tout autre : Une centrale en panne à Amsterdam peut être secourue par une unité disponible à Hambourg, elle ne peut pas l'être appréciablement par une unité installée en Sicile bien qu'elle soit en parfait synchronisme avec elle : les pertes marginales de transport dans un tel transfert et la probabilité de rencontrer des bouchons de puissance dans les mailles intermédiaires du réseau rendent très illusoire un secours de ce genre.

En fait les possibilités de substitution d'une unité à l'autre décroissent exponentiellement avec la distance.

La constante d'espace de cette décroissance dépend de la densité géographique de la consommation. Sur une surface uniforme où cette densité serait suffisante pour que la tension économique d'interconnexion soit de 100 kilovolts, comme c'est à peu près le

cas en Europe de l'Ouest, elle est de l'ordre de 300 kilomètres. On démontre facilement que cela conduit à ce qu'en tout point un réseau infini apporterait les mêmes possibilités d'échange qu'un réseau limité à un rayon égal à $\sqrt{2}$ fois la constance d'espace, soit de l'ordre de 500 kilomètres, mais où les pertes et les capacités de transport n'apporteraient aucun frein aux mouvements d'énergie à l'intérieur de ce cercle.

Ainsi en tout état de cause le bénéfice que la taille des unités apporte sous forme d'une réduction du coût d'investissement par unité de puissance subit une amputation grave si la puissance unitaire dépasse une certaine proportion des puissances installées dans un rayon déterminé, lui-même d'autant plus grand qu'il s'agit de régions plus consommatrices, c'est-à-dire plus industrielles.

En France cette limitation ne nous gêne pas mais elle s'opposerait par exemple à ce que les pays du sud-est de l'Europe aient intérêt à s'équiper en unités par trop puissantes.

LE DÉVELOPPEMENT DU TRANSPORT

Depuis la fin de la dernière guerre mondiale les réseaux régionaux, puis les réseaux nationaux, se sont petit à petit soudés entre eux sur toute l'Europe de l'Ouest.

La somme des longueurs de lignes, pondérées par leur capacité de transport, s'est développée à peu près comme la consommation de l'ensemble progressivement interconnecté.

La distance réelle moyenne de transport des kWh c'est-à-dire le quotient $\frac{\Sigma \text{kWh} \times \text{km}}{\Sigma \text{kWh}}$

a elle-même augmenté tant que le développement de l'hydraulique s'est poursuivi à une cadence telle qu'il fallait lui trouver un hinterland à grande distance. Elle est à peu près stable maintenant en France comme dans l'ensemble de l'Europe.

On peut se demander ce que ces distances de transport deviendront dans l'avenir devant la régression de la part de l'hydraulique et devant le développement du nucléaire qui n'a pas de région d'attraction comme les thermiques classiques en ont dans les bassins miniers ou dans le voisinage des raffineries.

L'objectif principal dans le choix des sites des centrales est en effet d'être aussi près que possible des consommations de manière à minimiser le transport.

Si les unités de petite taille telles que les Diesels avaient été économiques — ou si elles le devenaient un jour — la solution optimum serait de desservir les centres de consommation par des centrales locales et de les interconnecter par un réseau général assez léger, mais suffisant pour assurer les secours réciproques, mettre en commun les réserves et bénéficier de la diversité entre les courbes de charges des différents centres de consommation. C'était la conception initiale du « Grid » anglais.

Nous évoluerions dans ce sens si les grandeurs des centrales croissaient moins vite que les consommations, mais il n'en est pas ainsi.

Pour voir les choses clairement il faut éviter de confondre, comme on le fait parfois, la taille des unités et la taille des centrales.

Il est assez curieux que depuis le début du siècle la taille des unités thermiques ait crû à la cadence du doublement tous les dix ans, comme la consommation, si l'on fait abstraction des échelons dus à la normalisation des puissances.

Il en résulte tout de suite que dans les régions desservies par du thermique le nombre des unités est resté à peu près constant.

Mais tandis que la taille des unités a été commandée par son incidence sur le prix de revient, partiellement réduite par la nécessité d'un pourcentage de réserve plus élevé, la concentration des unités ainsi déterminées en centrales est commandée par un compromis tout différent entre la part fixe du coût des sites, indépendamment des unités qui y sont installées, et les charges de transport pour atteindre les consommateurs qui augmentent quand on concentre la production sur un moins grand nombre de sites.

Les centrales auraient augmenté de puissance, même si les unités étaient restées petites, au fur et à mesure que la consommation se serait développée.

Cette concentration ne s'arrête que lorsqu'elle bute sur le débit d'étiage des rivières des régions consommatrices.

Il faut alors chercher plus loin les estuaires ou la mer elle-même.

Comment les données de ce problème seront-elles modifiées lorsque l'on passera massivement aux centrales nucléaires :

D'une part on désire ne pas implanter ces centrales dans des zones à trop forte densité de population, en particulier pour pouvoir évacuer la population voisine en cas d'accident grave. Cette contrainte s'affaiblit au fur et à mesure que l'expérience des réacteurs existants inspire plus de confiance dans leur sécurité ; d'ailleurs la difficulté de trouver des terrains disponibles au bord de l'eau suffit déjà à écarter les centrales des villes dans la plupart des cas.

D'autre part les centrales nucléaires exigent des débits d'eau de réfrigération moitié plus importants, à puissance égale, que les centrales classiques. Les rendements ne sont heureusement pas dans le rapport inverse, car dans le cas de la centrale nucléaire presque toute l'énergie non transformée en électricité va au condenseur tandis que pour le thermique classique une partie seulement va au condenseur, le reste allant à la cheminée.

Le passage au nucléaire aura donc sur le transport deux répercussions en sens inverse :

- les préoccupations d'économie de transport du combustible, charbon ou fuel, n'interviendront plus pour éloigner les centrales des consommateurs en les attirant vers les mines et les raffineries,
- en sens inverse les disponibilités naturelles en eau de condensation ne permettront d'équiper qu'une puissance électrique moindre ; il faudra se rapprocher plus tôt de la mer en s'éloignant des centres de population à desservir.

Ces deux tendances en sens inverse joueront différemment suivant les situations géographiques. Au total et en moyenne sur l'Europe de l'Ouest elles ne changeront guère les distances de transport.

Ainsi les distances n'augmenteront plus, mais les puissances à transporter continueront à croître comme la consommation.

Or il existe deux moyens de réaliser des lignes de transport plus puissantes, l'un est d'augmenter les tensions, l'autre est d'augmenter les intensités. Le premier est quantifié en valeurs normalisées de la tension par l'intérêt de réduire le nombre des transformations, qui sont en quelque sorte des ruptures de charge, et de faciliter les maillages ; le deuxième peut au contraire être développé librement d'une manière continue.

Il existe un optimum de répartition des accroissements de puissance entre l'accroissement d'intensité, donc de section des conducteurs de lignes, et l'accroissement de tension qui coûte un peu dans les lignes et beaucoup dans les transformateurs et les disjoncteurs.

Dans toute la période où les distances de transport croissaient en même temps que les puissances augmentaient, le compromis optimum conduisait à ce que la tension croisse un peu plus vite que l'intensité.

On peut prévoir qu'il n'en sera plus tout à fait de même et que la part de l'intensité s'accroîtra un peu par rapport à celle de la tension dans l'élévation des puissances de transport.

Ceci est d'ailleurs renforcé par un début de saturation dans l'avantage d'élever la tension qui apparaît du fait qu'au delà de 400.000 volts les distances d'isolement ne restent plus proportionnelles à la tension, mais ont tendance à croître plus vite, l'amorçage des arcs changeant un peu de nature et commençant à s'apparenter, quoique de très loin, au phénomène de la foudre dans lequel les distances d'amorçage sont relativement considérables par rapport aux tensions entre nuages et terre.

Ainsi risque-t-il de s'écouler un peu plus de temps en Europe de l'Ouest entre le passage à 735 kV et le passage à 400 kV, qu'il ne s'en est écoulé entre le franchissement des échelons antérieurs analogues de tension. Naturellement il n'en est pas de même dans les régions hydrauliques où les distances de transport continuent à augmenter comme au Canada et en Sibérie.

Les centrales nucléaires à neutrons rapides

par **Georges VENDRYES**, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
Chef de Département au Commissariat à l'Énergie Atomique.

INTRODUCTION

En ce début de l'année 1968, la part de l'énergie électrique d'origine nucléaire est encore très modeste en France. Comptée en puissance installée ou en production effective de kWh, elle ne représente que quelques pour cent du total.

Il en est ainsi dans la plupart des grands pays industriels. Seule l'Angleterre qui, devant la crainte de difficultés d'approvisionnement en charbon et pétrole, s'est lancée dès 1955 dans un vaste programme de centrales nucléaires, en possède actuellement un grand nombre, dont la production d'électricité représente plus du dixième de la production nationale.

Mais la situation est sur le point de changer. Aux Etats-Unis, on assiste à une véritable percée du « nucléaire » dans la construction des centrales. En France, selon une récente déclaration de M. Olivier Guichard, Ministre de l'Industrie, la part du nucléaire en 1980 sera de 10%. Il est vraisemblable qu'à partir de 1975, on ne construira plus de centrales électriques autres que nucléaires.

Cependant, en même temps que s'affirme la progression de l'énergie nucléaire, l'intérêt respectif des différentes filières, c'est-à-dire des différentes formules techniques de réacteurs nucléaires, continue à faire l'objet de débats passionnés, où se mêlent avec des éclairages différents selon les pays, considérations techniques, arguments industriels, soucis économiques et arrière-pensées politiques.

LES FILIÈRES FRANÇAISES

La physionomie actuelle de l'équipement nucléaire de notre pays résulte d'un choix que nous avons fait il y a plus de quinze années, celui de la voie de l'uranium naturel et du plutonium. A l'époque, le seul moyen pour la France de produire, sans trop tarder, de l'énergie nucléaire et des matières fissiles en toute indépendance, c'est-à-dire avec les seules ressources nationales, était de construire des réacteurs fonctionnant à l'uranium naturel. L'utilisation de l'uranium naturel, qui ne contient que 0,7% d'uranium 235, impose de lui adjoindre un modérateur, substance chargée de ralentir les neutrons

pour leur permettre d'entretenir la réaction en chaîne. Deux corps peuvent servir de modérateurs avec l'uranium naturel : le graphite et l'eau lourde. Celle-ci, bien que fournissant une meilleure économie de neutrons que le graphite, ne fut pas retenue pour la première phase du programme français, à cause de son prix élevé et de l'absence d'une fabrication nationale. On aboutit ainsi à la mise au point, par le Commissariat à l'Énergie Atomique, d'une filière de réacteurs modérés au graphite et refroidis par du gaz carbonique sous pression, baptisée pour cette raison filière graphite gaz. Ces réacteurs, comme nous le verrons plus loin, produisent en même temps que de l'énergie, du plutonium qui est une matière fissile au même titre que l'isotope 235 de l'uranium.

Appartiennent à cette filière, les réacteurs G1, G2, G3 de Marcoule, essentiellement producteurs de plutonium, les centrales E.D.F. de Chinon 1, 2 et 3, celles de Saint-Laurent 1 et 2 et celle du Bugey, ces trois dernières en construction.

Toutefois, le C.E.A. poursuivait parallèlement la mise au point d'une filière à eau lourde, dont le prototype (centrale EL4 de 70 MWe des Monts d'Arrée) est entré en fonctionnement l'an dernier.

Enfin, une centrale à l'eau légère sous pression, fonctionnant à l'uranium enrichi a été réalisée à Chooz (Ardennes) en association avec la Belgique, en vue de familiariser l'E.D.F. avec l'exploitation de ce type de réacteur. Cette centrale est en marche depuis un an.

L'an dernier, une Commission spéciale pour la Production d'Énergie d'Origine Nucleaire a été chargée, sous la présidence du Secrétaire Général à l'Énergie d'examiner le problème de fond du programme français. Elle doit prochainement faire part au Gouvernement de ses avis. Très schématiquement, les questions suivantes se posent à cette Commission : Devons-nous poursuivre nos investissements dans la filière graphite gaz ? Faut-il diversifier, mettre au point une filière à eau lourde ou à eau légère nationale, ou encore acheter des licences américaines ? Il convient de noter que, sans attendre ses conclusions, le gouvernement a confirmé récemment la construction de la centrale de Fessenheim (graphite-gaz) qui était en suspens, montrant par là l'intérêt qu'il attache à la filière qui a, jusqu'ici, assuré notre indépendance nucléaire. Nous nous trouvons actuellement dans une période d'attente et il serait bien hasardeux de faire des pronostics sur l'orientation que va prendre le programme français dans les quelques années qui viennent.

Cependant, au-dessus de la mêlée, ou du moins à l'écart de ces controverses, nous voyons déjà poindre à l'horizon un type nouveau de réacteur qui, de l'avis quasi général, constitue la formule de l'avenir : le réacteur à neutrons rapides, ainsi nommé parce qu'on s'efforce d'y maintenir les neutrons à une énergie aussi élevée que possible.

Les espérances qu'il porte, les problèmes techniques qu'il soulève, l'effort important qui lui est consacré en France, justifient que nous lui consacrons entièrement cet article.

LA SURRÉGÉNÉRATION

La caractéristique fondamentale des réacteurs à neutrons rapides est d'être surrégénérateurs, c'est-à-dire de fabriquer, comme sous produit de leur fonctionnement, plus de matière fissile qu'ils n'en consomment. Cette remarquable propriété, qu'ils sont les seuls à posséder parmi toutes les filières de réacteurs, mérite quelques explications.

On sait que, dans un réacteur nucléaire, l'énergie provient de la fission des noyaux lourds constituant la matière fissile : uranium 235 ou plutonium 239. Chaque fission est, en moyenne, accompagnée de l'émission de 2 à 3 neutrons dont chacun est capable de provoquer à son tour une nouvelle fission. C'est ce qui permet d'établir une réaction en chaîne. En fonctionnement, il suffit d'un seul neutron pour entretenir la réaction. Les autres sont capturés dans les matériaux avoisinants ou s'évadent à l'extérieur.

Des neutrons peuvent en particulier être capturés par des noyaux d'uranium 238 qui constitue plus de 99% de l'uranium extrait du sol. Or, il se trouve qu'après avoir absorbé un neutron, un noyau d'uranium 238 se transforme en plutonium 239.

Dans tout réacteur dont le combustible contient de l'uranium (que cet uranium ait sa composition naturelle ou qu'il soit enrichi ou appauvri en U 235), le dégagement d'énergie dû aux fissions s'accompagne de la production parallèle d'une nouvelle substance fissile à partir de l'U 238 qu'on qualifie pour cette raison de substance fertile.

Le rapport du nombre des noyaux fissiles reproduits à celui des noyaux fissiles consommés pendant le même temps est une grandeur importante, qui dépend des caractéristiques particulières à chaque type de réacteur. On l'appelle le taux de régénération.

Lorsque le réacteur fonctionne avec des neutrons lents — c'est le cas de toutes les centrales nucléaires actuelles — le taux de régénération demeure inférieur à 1, pour des raisons qui tiennent aux propriétés nucléaires des noyaux en présence. Par contre, dans un réacteur à neutrons rapides, ce taux de régénération peut notablement dépasser l'unité. En associant le plutonium à l'uranium 238 on pense pouvoir atteindre des valeurs de l'ordre de 1,3 à 1,4.

Dans un réacteur à neutrons lents, seule une faible fraction (de l'ordre de 2%) de l'uranium naturel peut être dans la pratique convertie en plutonium, c'est-à-dire rendue utilisable pour la production d'énergie. Dans un réacteur à neutrons rapides, il est en principe possible de convertir progressivement en plutonium la totalité de ce même uranium. Cela signifie que dans ce deuxième cas, on pourra extraire 50 fois plus d'énergie d'une quantité donnée d'uranium extrait du sol.

Dans un tel réacteur surrégénérateur, tout se passe comme si le plutonium introduit au départ ne servait qu'à amorcer la combustion, le réacteur ne brûlant plus ensuite que de l'uranium 238 et fabriquant en même temps comme sous-produit un excédent net de plutonium.

Pour situer les ordres de grandeur, on peut indiquer qu'une centrale future à neutrons rapides, d'une puissance de 1 million de kilowatts électriques, nécessitera un approvisionnement initial de 3 tonnes de plutonium. Pour fonctionner, elle consommera une tonne d'uranium naturel ou appauvri par an, là où une centrale thermique moderne de même puissance absorberait 3 millions de tonnes de charbon. Dans le même laps de temps, elle produira 300 kg de nouveau plutonium, si bien qu'en une dizaine d'années, elle en aura accumulé de quoi nourrir une nouvelle centrale à neutrons rapides identique.

Le jour où la production d'électricité sera assurée par ces centrales nucléaires régénératrices, le problème de l'approvisionnement en combustible perdra de son acuité, s'il n'est pas complètement résolu. Elles pourront apporter une réponse définitive à des besoins en énergie qui croissent sans cesse et offrir aux pays qui les emploieront la promesse d'une indépendance énergétique absolue.

Mais il faut reconnaître que du point de vue de l'économie du combustible naturel, la surrégénération ne deviendra vraiment nécessaire qu'à très long terme, vers l'an 2000 pour fixer les idées. On pourrait donc considérer les réacteurs à neutrons rapides comme une sorte de système de secours, que l'on garde en réserve pour le moment où l'épuisement des réserves d'uranium rendrait son utilisation indispensable.

Cependant, on assiste depuis quelques années à un puissant mouvement d'intérêt en faveur de ces réacteurs, qui se concrétise par le fait que plusieurs prototypes de centrales à neutrons rapides sont actuellement en construction ou en voie de l'être. Seul un intérêt économique très actuel peut justifier aux yeux des Gouvernements un tel développement et de tels investissements.

Ils disposent en effet d'un certain nombre d'atouts techniques qui devraient de toute manière assurer leur rentabilité à moyen terme, en leur permettant de produire de l'électricité à un coût comparable ou même inférieur à celui offert par les centrales classiques nucléaires ou non.

La régénération du plutonium est très favorable à l'obtention d'un cycle de combustible économique. Encore faut-il réaliser un élément combustible capable de supporter un très long séjour dans le réacteur. La grande compacité des réacteurs à neutrons rapides, qui est une de leurs caractéristiques, la possibilité d'atteindre des rendements nets dépassant 40% grâce à l'emploi du sodium comme fluide de transfert thermique, sont d'autres éléments favorables qui tendent à abaisser le coût du KWe installé. Mais d'importants progrès technologiques sont encore nécessaires pour maîtriser à une échelle vraiment industrielle les problèmes qui se posent encore et que nous allons maintenant examiner d'un peu plus près.

PROBLÈMES TECHNIQUES

Traits généraux.

Comme tout bon réacteur, un réacteur à neutrons rapides est constitué essentiellement d'une chaudière dans laquelle se trouvent rassemblées la matière fissile et la matière fertile en éléments combustibles qui forment ce que l'on appelle le cœur. C'est là que se dégage la chaleur. Elle est extraite par un fluide que l'on fait circuler autour des éléments combustibles. Dans des échangeurs, le fluide caloporteur cède sa chaleur à un fluide de travail, généralement de l'eau, et la vapeur produite est utilisée pour actionner un groupe turboalternateur.

Pour que le réacteur fonctionne l'arrangement des éléments combustibles dans le cœur est soumis aux conditions de criticité déterminées par l'étude neutronique du réacteur. Cela signifie que, dans un certain volume doit se trouver une certaine quantité de matière fissile et de matière fertile, compte tenu des matériaux de structure et du fluide circulant, pour réaliser une configuration critique où la réaction en chaîne s'amorcera d'elle-même dès que l'on retirera du cœur les absorbants de neutrons que constituent les barres de contrôle. L'absence de modérateur conduit à un dessin très compact du cœur.

Du fait que la réaction en chaîne se déroule avec des neutrons rapides, pour lesquels les probabilités de réactions nucléaires sont faibles, il faut que la concentration des noyaux fissiles dans le cœur du réacteur soit forte. Le combustible d'un réacteur à neutrons rapides aura donc une teneur élevée (15 à 25%) en matière fissile. Pour la même raison, le flux de neutrons qu'on entretiendra dans le réacteur sera considérable : 10^7 à 10^8 neutrons par cm² et par seconde, soit 10 à 100 fois celui d'un réacteur à neutrons lents de même puissance.

Le combustible.

La mise au point d'un élément combustible satisfaisant est le problème majeur. Pour situer les conditions dans lesquelles doivent fonctionner les éléments combustibles d'un réacteur à neutrons rapides, il est bon de faire quelques comparaisons. Dans la chaudière d'une centrale moderne de l'E.D.F. brûlant du pétrole, la puissance thermique par unité de volume de la chambre de combustion est de l'ordre de 200 W/dm³. Dans un réacteur d'avion (ATAR par exemple) on dégage une puissance de 200 kW/dm³. Enfin, en haut de l'échelle, le moteur le plus puissant existant actuellement, celui de la fusée, fournit une puissance spécifique de 10 à 15 MW par dm³, mais on ne lui demande qu'une durée de fonctionnement très limitée.

Dans un réacteur industriel à neutrons rapides la puissance produite sous forme de chaleur dans le cœur est de l'ordre de 500 kW par dm³. Cette densité élevée de puissance par unité de volume est une caractéristique intrinsèque des réacteurs à neutrons rapides.

Elle est due à la fois à la grande concentration de la matière fissile et au souci d'en extraire le maximum de puissance par unité de masse pour diminuer l'investissement en capital.

On voit que les éléments combustibles doivent faire face à des conditions thermiques extrêmement sévères. Pour pouvoir extraire une puissance aussi élevée, il faut que le combustible soit mis sous une forme très dispersée, de manière à favoriser les échanges thermiques avec le fluide caloporteur. On le dispose à l'intérieur d'aiguilles de 5 à 6 mm de diamètre dont la température en fonctionnement atteint 600° C en surface et 2500° C au centre. Ces aiguilles sont réunies en faisceaux dans des tubes de section hexagonale, qui s'emboîtent les uns à côté des autres. Un faible espace est laissé entre les aiguilles pour permettre au fluide de circuler tout autour de chacune d'elles. La figure 1 montre la constitution d'un assemblage combustible du réacteur Rapsodie. Sur la photographie de couverture on voit comment ces assemblages sont disposés dans la cuve du réacteur.

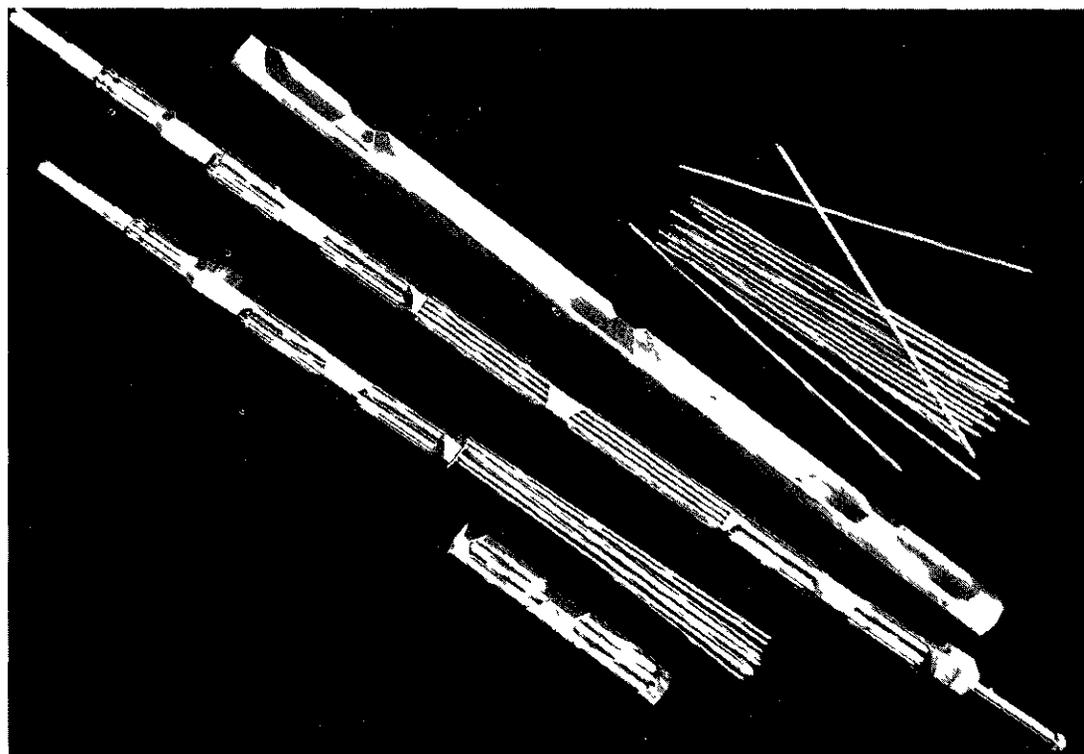


Photo P. Jahan

Fig. 1. — Assemblage d'aiguilles combustibles de Rapsodie

La matière fissile la mieux adaptée au fonctionnement des réacteurs à neutrons rapides est non pas l'uranium 235, mais le plutonium, qui trouve là sa meilleure utilisation. Les propriétés nucléaires de ces deux substances font que, dans un réacteur à neutrons rapides, 1 gramme de plutonium équivaut à environ 1,4 g de U 235, alors que dans un réacteur à neutrons lents, c'est l'inverse, 1 g de plutonium équivaut à environ 0,75 g de U 235. Actuellement la forme chimique qui paraît la meilleure pour utiliser ce plutonium est l'oxyde. Les pastilles de combustible sont formées d'un mélange des deux oxydes Pu O₂ et U O₂, ce dernier contenant la matière fertile sous forme d'uranium naturel ou appauvri. Pour que le coût du cycle de combustible, qui joue un rôle essentiel dans l'économie de cette filière, soit suffisamment bas, il faut qu'une fraction importante du combustible soit brûlée en une seule fois, avant que les aiguilles irradiées ne doivent être reti-

rées et envoyées à l'usine de retraitement. On dit que le taux de combustion doit être très élevé. L'objectif que l'on se fixe est de brûler une proportion de 10% environ du total des noyaux lourds (plutonium et uranium) présents dans le combustible. A titre de comparaison, il faut noter que dans les réacteurs à graphite gaz, le taux de combustion maximum que l'on obtient est de l'ordre de 0,3% à 0,5% des noyaux lourds. Il est de 0,8% à 1% dans les réacteurs à eau lourde. Les résultats obtenus à ce jour permettent d'affirmer que des taux de combustion de 5 à 6% pourront être obtenus avec l'oxyde mixte U O₂-Pu O₂ et que les 10% sont à notre portée. L'oxyde mixte n'est peut-être pas encore le combustible idéal et il se peut que les carbures ou les nitrures se montrent encore meilleurs. Leur principal avantage sur l'oxyde est de présenter une meilleure conductibilité thermique. Mais ils soulèvent des problèmes de compatibilité avec le matériau de gainage et de tenue sous irradiation qui sont loin d'être résolus.

Les principaux obstacles que l'on rencontre sur la voie menant à un taux de combustion de 10% sont liés aux transformations qui se produisent dans le combustible par l'accumulation des déchets de la fission à la place des atomes brûlés et dans la gaine soumise à l'action des neutrons. Il se produit notamment un gonflement de l'oxyde et une augmentation de la pression à l'intérieur de la gaine, due au dégagement des produits de fission gazeux. Ces deux phénomènes ont tous deux tendance à déformer une gaine que l'on fait travailler dans des conditions extrêmement dures : à des températures dépassant 600° C, elle est soumise à des contraintes croissantes avec le temps, alors que le bombardement particulièrement intense des neutrons fragilise le matériau. C'est actuellement une de nos préoccupations principales dans la mise au point de l'élément combustible. Aussi étudie-t-on de très près le comportement des matériaux de gainage sous irradiation et aux températures de fonctionnement. Les matériaux considérés actuellement comme les meilleurs sont des aciers inoxydables austénitiques et des alliages de nickel. Mais ces études sont très longues, car il faut plusieurs années d'irradiation dans les réacteurs expérimentaux actuels pour reproduire les conditions qui seront atteintes dans les grands réacteurs futurs.

L'emploi du sodium.

Dans un réacteur où l'on cherche à maintenir les neutrons à une énergie élevée, on évitera soigneusement d'employer un fluide de refroidissement qui pourrait les ralentir. L'emploi de l'eau est donc exclu. A cause de la grande densité de puissance que nous avons mentionnée, il faudra un fluide qui ait des qualités exceptionnelles au point de vue thermique.

Ce sont les métaux liquides qui répondent le mieux à ces exigences, et plus particulièrement le sodium. C'est lui qui est utilisé dans tous les réacteurs à neutrons rapides existants et dans les projets actuels les plus avancés. Etant un métal, il a une conductibilité thermique très élevée. Son coefficient de transfert thermique est l'un des meilleurs que l'on connaisse, ce qui permet une faible chute de température entre la paroi de la source de chaleur — ici la gaine de l'aiguille combustible — et le fluide en circulation. Par contre, sa capacité calorifique est 4 fois plus faible que celle de l'eau, ce qui impose des débits plus élevés. Le sodium peut être mis en circulation sans difficulté avec des pompes mécaniques, sa densité et sa viscosité à 400°-500° C étant très voisines de celles de l'eau. La puissance de pompage à mettre en œuvre est seulement de l'ordre de 2% de la puissance électrique produite. On peut aussi le faire circuler par des pompes électromagnétiques qui fonctionnent suivant le principe de la règle bien connue des trois doigts d'Ampère, et que l'on emploie dans certains circuits annexes à faible débit.

Un avantage très important est que sa température d'ébullition à la pression atmosphérique est de 883°. Cela permet de l'utiliser à des niveaux de température de 500° C à 600° C dans des installations où ne règne aucune forte pression, et d'atteindre des rendements thermodynamiques nets qui dépassent 40%, en produisant de la vapeur à 540° C et 165 bar, analogue à celle qui est produite dans les centrales thermiques les plus modernes de l'E.D.F. On peut ainsi utiliser des groupes turboalternateurs déjà éprouvés sans recourir à des fabrications spéciales.

Enfin, entrant dans la fabrication du plomb tétraéthyle, le sodium est dès maintenant un produit industriel courant, dont le prix ne dépasse pas 2 F le kilogramme.

A côté de tous ces avantages, le sodium a malheureusement aussi des inconvénients.

Le premier, c'est la nouveauté de son emploi à une échelle industrielle. Les réacteurs à sodium se trouvent dans une situation toute différente de celle des réacteurs à eau, qui ont bénéficié dès le départ d'une technologie connue et améliorée depuis fort longtemps. Mais les progrès accomplis en un peu plus de 10 ans dans le domaine de la technologie du sodium sont tellement considérables que l'on peut avoir toute confiance sur l'aboutissement final.

Le sodium est ensuite un matériau d'une grande activité chimique. Il s'oxyde facilement, brûle spontanément dans l'air quand sa température atteint quelques centaines de °C et réagit de façon très vive en présence d'eau. On doit maintenir le sodium à l'abri de tout contact avec l'air en l'enfermant dans des circuits rigoureusement étanches, et disposer au-dessus des niveaux libres un gaz inerte comme l'azote ou l'argon.

Dans les circuits primaires des réacteurs où il traverse le cœur dans un intense flux neutronique, le sodium s'active et l'exigence d'une étanchéité absolue de ces circuits est encore plus rigoureuse. Pour éviter les risques de feu de sodium actif en cas de fuite, les parois des tuyaux sont doublées.

La conception des appareils où le sodium cède sa chaleur à de l'eau pour produire de la vapeur pose des problèmes particulièrement délicats. Il s'agit d'amener les deux fluides aussi près que possible l'un de l'autre en évitant qu'ils puissent venir en contact.

La difficulté réside surtout dans le choix des matériaux qui doivent avoir une bonne compatibilité à la fois avec le sodium et avec l'eau. Les premiers générateurs de vapeur chauffés au sodium étaient des appareils à double paroi, où un espace annulaire, rempli par un fluide auxiliaire, séparait les tuyaux parcourus respectivement par le sodium et l'eau ou la vapeur. Ces appareils sont de construction compliquée et coûteuse. La tendance générale est maintenant de réaliser des appareils à simple paroi.

L'étanchéité absolue reste bien entendu le critère fondamental, mais les conséquences d'une fuite peuvent être réduites, grâce à la division de l'appareil en un grand nombre de modules séparables les uns des autres par des dispositifs d'isolement rapide et de rétention des produits de la réaction.

Il ne s'agit d'ailleurs pas seulement d'éviter des fuites importantes qui provoqueraient une réaction violente entre sodium et eau, mais même des porosités dans le métal, qui entraîneraient une production continue de soude, d'oxyde de sodium et d'hydrogène dans le sodium. L'oxyde et la soude étant des produits très corrosifs, des ruptures de tubes de vapeur pourraient ensuite se produire.

De nombreux modèles de générateurs de vapeur alimentés par sodium commencent à être essayés ici et là. Il s'agit maintenant de parvenir à des prix de revient satisfaisants, compte tenu d'un contrôle de fabrication extrêmement poussé.

LE PROGRAMME FRANÇAIS : RAPSODIE ET PHENIX

Où en sommes nous en France dans la poursuite de ce que l'on pourrait appeler la quête de la surrégénération ?

C'est en 1957 qu'un petit groupe du C.E.A. commença à s'intéresser de manière concrète aux réacteurs à neutrons rapides avec des moyens très modestes. C'était le début d'une grande aventure. Dix ans plus tard, nous avons au Centre de Cadarache un réac-

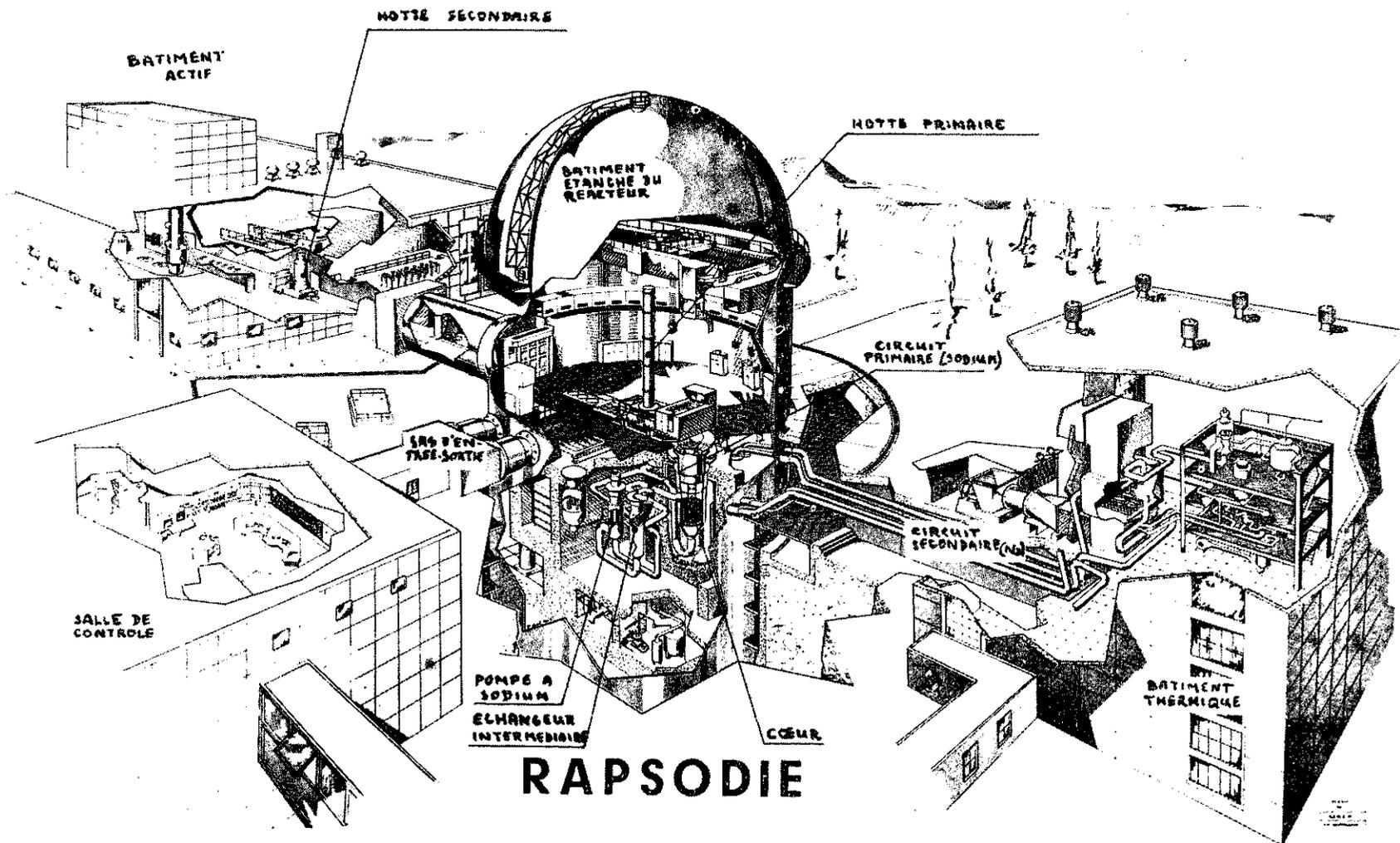


Fig. 2. — « Ecorché de l'installation de Rapsodie »



Fig 3 — « Vue aérienne du secteur du centre de Cadarache affecté à l'étude des réacteurs à neutrons rapides »

teur de 24 MW thermiques en pleine exploitation : Rapsodie dont le nom rappelle l'association des neutrons rapides avec le sodium. Ce réacteur (fig. 2) était l'objectif raisonnable que nous pouvions nous fixer dans une première étape, compte tenu de notre expérience encore limitée dans le domaine de la technologie du sodium. Sa puissance suffit néanmoins pour permettre d'y effectuer des essais d'irradiation de combustibles dans des conditions représentatives des futures centrales.

Dès l'ouverture du centre de Cadarache, une très importante infrastructure d'études et d'essais sur la technologie du sodium y fut installée. Toute une zone du centre est maintenant affectée aux activités concernant les réacteurs à neutrons rapides. La figure 3, qui est une vue d'ensemble de ce secteur, montre Rapsodie avec son bâtiment caractéristique en forme de cloche, les halls d'essais technologiques ainsi que deux installations consacrées à la physique des neutrons rapides : le petit réacteur Harmonie et l'installation pour maquettes critiques Masureca.

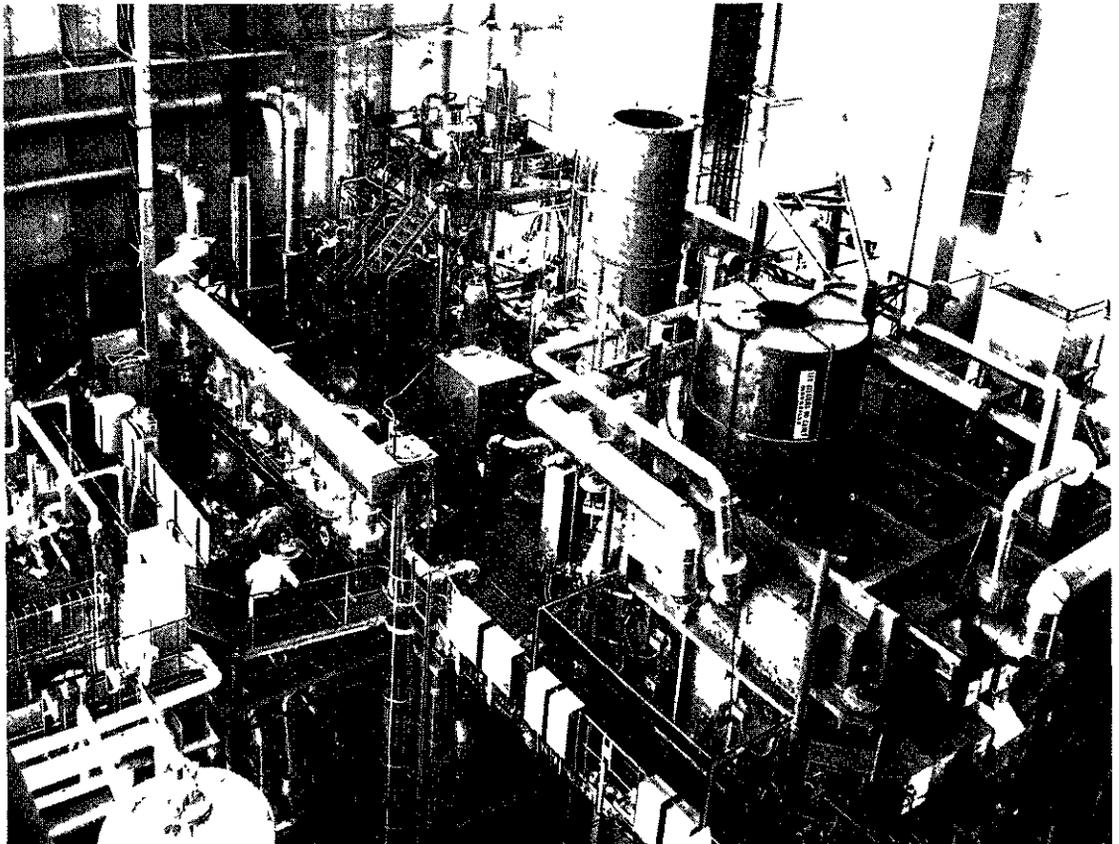


Fig. 4. — « Circuit expérimental à Sodium de 10 MW, prototype d'un circuit de Rapsodie »

La construction de Rapsodie a été précédée d'essais sur des modèles en vraie grandeur d'un certain nombre de constituants de réacteur, ce qui a beaucoup facilité la construction elle-même et les essais de mise au point de l'ensemble (fig. 4). A l'automne de l'année 1966, la construction était pratiquement terminée. Pendant toute cette année un effort très intense a été fourni, les essais d'ensemble ont été très laborieux et de nombreuses difficultés se sont présentées. Elles furent toutes surmontées et la première divergence de Rapsodie s'effectua le 28 janvier 1967 avec seulement un mois de retard par rapport au calendrier établi en 1964. Après une période d'essai, la puissance du réacteur fut rapidement portée à sa valeur nominale de 20 MW thermiques. A la fin de l'année 1967 elle put être augmentée et fut fixée à 24 MW. Cette première année de fonctionnement de Rapsodie s'est, au total, déroulée dans des conditions extrêmement satisfaisantes.

Rapsodie a apporte au CEA et a l'industrie française l'experience de construction d'un engin d'une puissance deja significative, qui comporte tous les organes d'un reacteur de centrale, sauf les generateurs de vapeur. Mais son but le plus important et le plus specifique est de servir de banc d'essai pour le combustible. Rapsodie est actuellement charge avec un combustible ceramique, melange d'oxydes U₂O₃-Pu₂O₃, qui a ete choisi au debut de 1963 de preference a l'alliage metallique. Ce choix etait a l'epoque deliberelement progressiste puisque, a part un petit reacteur russe, tous les reacteurs a neutrons rapides existants utilisaient des alliages metalliques. Il place maintenant Rapsodie a la pointe du progres, les alliages metalliques etant tout a fait depasses. Avec les quelque 2500 aiguilles d'oxyde qui constituent son coeur nous pouvons esperer obtenir si tout va bien une experience dont le caractere statistique n'a actuellement pas d'equivalent au monde.

Il est neanmoins bien clair que, dans une entreprise aussi nouvelle, des aleas, des incidents imprevis sont, malgre une vigilance constante, toujours possibles.

(CARACTERISTIQUES COMPARÉES DES COEURS DE RAPSODIE ET DE PHENIX)

	RAPSODIE	PHENIX
Puissance thermique (MW)	24	532
Puissance volumique maximale (kW/l)	590	670
Hauteur du coeur (cm)	34	85
Diametre du coeur (cm)	44,6	136,5
Températures du sodium a l'entree et a la sortie du coeur (°C)	405-495	400-560
Composition en volume du coeur (0/0)		
UO ₂ - PuO ₂	40	37
Na	33,5	35
Rapport $\frac{\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}}$ (0/0)	26	zone interne 19,8 zone externe 27,4
	uranium enrichi a 60 0/0	uranium appauvri
Puissance massique moyenne (MW/kg de matiere fissile)	0,24	0,75
Flux maximal (n/cm ² s)	2 10 ¹⁰	7 10 ¹⁰
Nombre d'assemblages	64	97
Nombre d'aiguilles par assemblage	37	217
Diametre des pastilles d'oxyde (mm)	5,57	5,5
Densite moyenne de l'oxyde dans la gaine (0/0 de densite theorique)	88	80
Epaisseur des gaines (mm)	0,45	0,45
Puissance lineaire maximale (W/cm)	400	430
Taux de combustion minimal vise (MW/t)	30 000	50 000

Fig. 5

L'etape suivante de notre programme est constituee par le reacteur Phenix dont le nom, par reference a l'oiseau fabuleux qui renait de ses cendres evoque la surregeneration.

Avec Phenix nous voulons demontrer la possibilite de construire en France un grand reacteur a neutrons rapides sans rencontrer d'obstacle majeur sur les plans technique et industriel. Pour lui donner le maximum de chances de succes, on ne cherchera pas a

obtenir de lui des performances sensationnelles. Dans tous les domaines, on visera des caractéristiques raisonnables étant entendu que beaucoup pourront être améliorées par la suite, soit sur Phenix même, soit sur des réacteurs futurs. Il faut avant tout que Phenix fonctionne dans les conditions prévues, avec des délais de construction et de mise en exploitation satisfaisants.

Nous n'attendons pas de ce réacteur prototype qu'il produise des KWh dont le coût soit compétitif. Au moins disposerons-nous grâce à lui des éléments nécessaires pour juger de la rentabilité des grandes centrales qui en dériveront.

C'est là une des raisons qui nous ont conduits à choisir pour Phenix une puissance déjà élevée : 250 MW électriques, ce qui correspond à environ 550 MW thermiques.

Les paramètres thermiques du cycle de vapeur ont été déterminés en vue de l'utilisation d'un groupe turboalternateur classique de 250 MWe tel que ceux qui équipent les centrales thermiques de l'E.D.F.

Le saut à partir de Rapsodie peut paraître ambitieux. En fait, comme le montre le tableau de la figure 5, les caractéristiques de Rapsodie et de Phenix sont beaucoup plus voisines que la simple comparaison des puissances totales ne le laisserait croire.

Les puissances volumiques maximales sont voisines. Les températures d'entrée du sodium également. La température de sortie du sodium de Rapsodie reste pour le moment limitée à 495° mais nous pensons pouvoir l'augmenter et aller éventuellement jusqu'à 550°. Le diamètre des aiguilles combustibles, l'épaisseur des gaines sont les mêmes. Le combustible est aussi le même, sauf en ce qui concerne la densité. La densité plus faible des pastilles d'oxyde de Phenix doit permettre aux aiguilles combustibles de mieux supporter l'effet de gonflement sous irradiation et d'atteindre un taux de combustion plus élevé que dans Rapsodie. On n'a pas cherché à obtenir un taux de régénération très élevé. Ce point fera par contre l'objet d'un examen attentif pour les très grands réacteurs ultérieurs.

Le schéma d'ensemble de Phenix diffère nettement de celui de Rapsodie (fig. 6) : tout le circuit de refroidissement primaire est un système dit intégré, où les pompes, les échangeurs et la cuve primaire contenant le cœur sont immergés dans une deuxième cuve de sodium (cuve principale). Cette conception, qui résulte d'une tendance que l'on retrouve dans d'autres filières, a des avantages sous l'angle de la simplicité, de la com-

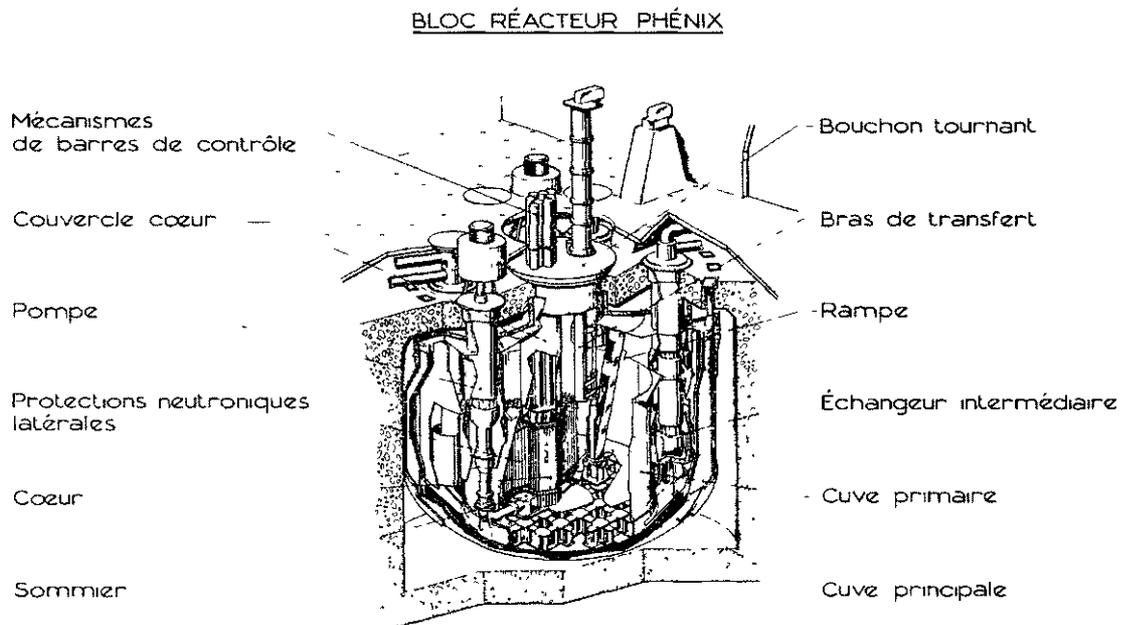


Fig. 6. — « Ecorché du réacteur Phénix »

pacité, et assure une grande sécurité de refroidissement pour le cœur. Il est significatif que, sur ce point, les études anglaises et les nôtres aient abouti à des schémas extrêmement voisins, bien qu'elles aient été menées de manière complètement indépendante.

Notre objectif est de mettre en construction Phenix dès le début de l'année 1969. Son site est déjà choisi : il s'élèvera à proximité immédiate du centre de Marcoule, au bord du Rhône.

Pour la réalisation de Phenix, le C.E.A. et l'E.D.F. se sont associés suivant une formule d'un type nouveau qui doit assurer l'unité d'action nécessaire à une bonne efficacité. Aux termes d'un protocole récemment conclu entre ces deux organismes, cette entreprise sera menée en commun. Le financement sera assuré dans sa totalité par des fonds publics, tous les marchés étant passés par le C.E.A. L'établissement du projet détaillé, la construction et les essais de Phenix seront confiés à une équipe unique, où travailleront côte à côte des spécialistes venus du C.E.A., de l'E.D.F. et de l'industrie, choisis et placés en fonction de leur compétence.

PROJETS ETRANGERS

La plupart des pays les plus avancés dans les techniques nucléaires viennent d'aborder ou vont prochainement aborder dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides la même étape que représente pour nous Phenix.

En Grande-Bretagne, la réalisation du P.F.R. (Prototype Fast Reactor) réacteur à circuits intégrés de 250 MWe est menée activement à Dounreay, sur la côte nord de l'Ecosse. La date de fonctionnement annoncée (1971) a toute chance d'être tenue.

En U.R.S.S., la construction de BN 350, prototype de 350 MWe (dont en fait l'équivalent de 250 MWe sert au dessalement de l'eau de la mer Caspienne) se poursuit à Chechenko. Sans attendre sa mise en service prévue pour 1969, il semble que le gouvernement soviétique soit sur le point de décider la construction d'une centrale à neutrons rapides de 600 MWe à circuits intégrés.

En Allemagne, deux prototypes de 300 MWe, l'un refroidi par le sodium, l'autre par la vapeur, sont à l'étude. Le début de leur construction se situera vraisemblablement en 1970 pour le prototype au sodium et certainement plus tard pour le prototype à la vapeur.

La Commission américaine de l'Energie Atomique a jusqu'ici refusé de s'engager dans la réalisation et surtout le financement par fonds publics d'un prototype et donne la priorité à des études de mise au point d'équipements et de combustibles. Les grandes compagnies américaines telles que General Electric ou Westinghouse préconisent au contraire la réalisation rapide d'un prototype. Les études qu'elles ont entreprises les mettraient en état d'en entreprendre la construction entre 1969 et 1971.

D'autres pays comme le Japon, l'Italie et la Suède s'engagent à leur tour dans la voie des réacteurs à neutrons rapides.

La comparaison entre ces différents programmes fait ressortir deux points essentiels :

a) l'Europe occupe dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides une forte position. En particulier, ses moyens d'études et d'essais ne le cèdent en rien à ceux des Etats-Unis. Mais cette situation ne se maintiendra que si nous faisons preuve d'une extrême vigilance dans tous les domaines, et d'abord sur le plan industriel. Une dispersion des efforts européens la compromettrait bien vite, devant la puissance et le dynamisme de l'industrie américaine.

b) il y a une convergence remarquable des efforts vers la formule de réacteur à neutrons rapides utilisant le sodium et un combustible céramique. Ce fait est de nature à hâter la percée technique et économique des surrégénérateurs.

Avec le projet Phenix et la récente mise en service de Rapsodie, la France occupe une bonne place dans le peloton. Il est permis de penser que Phenix profitera au mieux de l'expérience qui s'accumule, sans que nous devions prendre trop de risques. Mais cette position ne peut être maintenue qu'au prix d'un effort soutenu.

L'enjeu que représente Phenix est très important pour l'avenir énergétique de notre pays et les enseignements que nous en tirerons pèseront d'un poids très lourd sur l'orientation que prendra ensuite notre programme électronucléaire. Il est bien clair en tout cas que l'essor de cette nouvelle filière qui se rattache très logiquement à la voie dans laquelle s'est engagée la France au départ est lié aux disponibilités en plutonium pour alimenter les charges initiales des premiers réacteurs. Actuellement, il y a pénurie. Mais à partir de 1975-1980, quelle que soit l'orientation que prendra d'ici là le programme nucléaire français, des tonnes de plutonium produites dans les réacteurs existants ou en construction, vont se trouver disponibles pour le secteur civil. Si Phenix, comme nous l'espérons, réussit dans sa mission, il y a tout lieu de penser que la filière des réacteurs à neutrons rapides sera exacte au rendez-vous du plutonium et prête à assurer, à partir de 1980, une part rapidement croissante de la production d'électricité nationale.

MUTATIONS, PROMOTIONS et DÉCISIONS diverses concernant les Corps des Ingénieurs des Ponts et Chaussées et des Mines

PROMOTIONS

Par décret du Président de la République en date du 11 janvier 1968, M. **Aubriot** Jacques, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, inscrit au tableau d'avancement pour le grade d'Ingénieur Général des Ponts et Chaussées est promu Ingénieur Général des Ponts et Chaussées à compter du 1^{er} décembre 1967.

J.O. du 18 janvier 1968.

Par arrêté du Ministre de l'Équipement et du Logement en date du 20 décembre 1967, M. **Mathieu** Jean, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées de 2^e classe, inscrit au tableau d'avancement pour 1^{re} classe, a été nommé Ingénieur Général des Ponts et Chaussées de 1^{re} classe, 1^{er} échelon, à compter du 1^{er} décembre 1967.

J.O. du 25 janvier 1968

Par décret du Président de la République en date du 26 janvier 1968, les Ingénieurs en Chef des Ponts et Chaussées dont les noms suivent inscrits au tableau d'avancement pour le grade d'Ingénieur Général, sont promus Ingénieurs Généraux des Ponts et Chaussées à compter du 31 décembre 1967.

MM **Vasseur** Jacques, **Ternant** Gérard et **Haas** René

J.O. du 3 février 1968.

MUTATIONS ET NOMINATIONS

Par arrêté en date du 18 décembre 1967, M. **Texier** Georges, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, a été nommé Chef de la 1^{re} Circonscription électrique à Paris et chargé, par intérim, de la 3^e Circonscription électrique à Nantes à compter du 1^{er} janvier 1968, en remplacement de M. **Lamouroux** François, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, promu au grade d'Ingénieur Général et appelé à d'autres fonctions.

J.O. du 11 janvier 1968.

Par arrêté en date du 21 décembre 1967, M. **Laurant** Michel, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, a été nommé chef du service technique de l'énergie électrique et des grands barrages à compter du 1^{er} janvier 1968, en remplacement de M. **Texier** Georges, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, appelé à d'autres fonctions.

J.O. du 11 janvier 1968.

Par arrêté du Premier Ministre, du Ministre de l'Économie et des Finances et du Ministre de l'Équipement et du Logement en date du 10 janvier 1968, M. **Castres Saint Martin** Michel, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, est placé en service détaché pour une période de cinq ans, éventuellement renouvelable, auprès du Premier Ministre (Commissariat à l'aménagement du marché d'intérêt national de la région parisienne) en vue d'être chargé d'une mission de liaison avec la gare routière de Rungis.

Les présentes dispositions prennent effet du 1^{er} octobre 1964.

J.O. du 21 janvier 1968.

Par arrêté du Premier Ministre, du Ministre des Affaires Étrangères et du Ministre de l'Équipement et du Logement en date du 18 janvier 1968, M. **Boumendil** Henri, Ingénieur des Ponts et Chaussées précédemment en service détaché auprès du Ministère des Affaires Étrangères, est réintégré pour ordre dans les cadres de son administration d'origine et replacé en service détaché auprès du Ministère des Affaires Étrangères pour une période de trois ans éventuellement renouvelable en vue d'être mis à la disposition de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture à Rome, en qualité d'expert en irrigation.

Les présentes dispositions prennent effet du 1^{er} juillet 1966

J.O. du 24 janvier 1968.

Par arrêté du Premier Ministre, du Ministre de l'Équipement et du Logement et du Ministre de l'Économie et des finances en date du 18 décembre 1967, M. **Giraud** André, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, est placé en service détaché auprès du Bureau administratif et technique de l'habitation en vue d'exercer les fonctions de directeur général.

Les présentes dispositions auront effet du 1^{er} janvier 1964 au 31 janvier 1967.

J.O. du 4 février 1968.

Par arrêté du Premier Ministre, du Ministre de l'Éducation Nationale, du Ministre de l'Économie et des Finances et du Ministre de l'Équipement et du Logement en date du 20 décembre 1967, M. **Weber** Jean, Ingénieur des Ponts et Chaussées, est placé en service détaché auprès du Ministre de l'Éducation Nationale pour une période de trois ans, éventuellement renouvelable, en vue d'occuper un poste d'as-

sistant au Département de mathématique de la faculté des sciences de Strasbourg.

Le présent arrêté prend effet du 1^{er} octobre 1967.

J.O du 4 février 1968.

Par arrêté du Premier Ministre, du Ministre des Affaires Etrangères et du Ministre de l'Équipement et du Logement en date du 8 février 1968, les Ingénieurs des Ponts et Chaussées dont les noms suivent sont placés en service détaché auprès du Ministère des Affaires Etrangères pour les périodes ci-après indiquées en vue de continuer à servir au Maroc au titre de la coopération technique.

M **Boumendil** Henri, du 1^{er} janvier 1963 au 30 septembre 1963.

M **Cavassilas** Dimitri, du 1^{er} janvier 1963 au 15 mai 1963.

M **Juton** Marcel, du 1^{er} janvier 1963 au 31 décembre 1967.

M. **Nicolas** Joseph, du 1^{er} janvier 1963 au 31 décembre 1967

MM **Boumendil** et **Cavassilas** sont réintégrés dans les cadres de leur administration d'origine respectivement les 1^{er} octobre 1963 et 16 mai 1963.

M. **Vial** Alan, Ingénieur des Ponts et Chaussées précédemment en service détaché auprès du Secrétariat d'État aux Affaires Etrangères chargé de la Coopération est réintégré dans les cadres de son administration d'origine et mis à la disposition de la Société Nationale des Chemins de Fer Français.

Ces dispositions prennent effet au 1^{er} janvier 1968.

Un arrêté interministériel plaçant M. **Vial** dans la position statutaire de détachement interviendra ultérieurement.

Arrêté du 20 décembre 1967.

M **Elkouby** Joseph, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées est nommé Directeur Départemental de l'Équipement des Yvelines.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968

Arrête du 22 décembre 1967

M **Tessonneau** Pierre, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, est nommé Directeur départemental de l'Équipement du Val d'Oise.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968

Arrête du 22 décembre 1967.

M. **Trotel** Raymond, Ingénieur des Ponts et Chaussées de 2^e classe, (8^e échelon), précédemment en service détaché, est réintégré dans les cadres de son Administration d'origine et affecté à l'arrondissement Sud à Bourges de la Direction départementale de l'Équipement du Cher

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968.

Arrête du 16 janvier 1968.

M. **Baillif** Jean-Claude, Ingénieur des Ponts et Chaussées, précédemment au Service spécial des Autoroutes est chargé de mission auprès du Sous-Directeur de l'exploitation et de la réglementation de la Direction des Routes et de la Circulation routière

Arrête du 19 janvier 1968

Il est mis fin à la mise à disposition du Ministre de l'Intérieur de M. **Chauchoy**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968.

A compter de cette même date, M **Chauchoy**, est attaché au Conseil Général des Ponts et Chaussées, au sens de l'article 9 — § b — du décret 61-43 du 12 janvier 1961.

Arrête du 19 janvier 1968.

M **Fleury** Philippe, Ingénieur des Ponts et Chaussées, précédemment mis à la disposition du Ministère de la Construction est chargé de mission auprès du Sous-Directeur des Investissements de la Direction des Routes et de la Circulation routière

Ces dispositions prennent effet au 1^{er} mars 1968.

Arrête du 19 janvier 1968

M. **Villaret** Alan, Ingénieur des Ponts et Chaussées, précédemment à l'arrondissement territorial de Marseille 1, est chargé de l'arrondissement autoroute (poste hors organigramme) de la Direction départementale de l'Équipement des Bouches-du-Rhône en remplacement de M. **Tiphine** Jacques, appelé à d'autres fonctions

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968.

Arrête du 31 janvier 1968.

M **Mailland** Hubert, Ingénieur des Ponts et Chaussées, est mis à la disposition du Bureau Central d'Études pour les Equipements d'Outre-Mer, en vue d'exercer des fonctions de Directeur d'une mission d'études autoroutières au Liban.

Ces dispositions ont effet au 1^{er} janvier 1968.

Un arrêté interministériel plaçant M **Mailland** dans la position statutaire de détachement interviendra ultérieurement.

Arrête du 1^{er} février 1968.

M **Lefrou** Claude, Ingénieur des Ponts et Chaussées, précédemment détaché auprès du Secrétaire d'État chargé de la Coopération est réintégré pour ordre dans les cadres de son Administration d'origine et mis à la disposition de l'Agence de Bassin « Artois-

Picardie » en qualité de Directeur-adjoint.

Ces dispositions ont effet au 1^{er} janvier 1968.

Un arrêté interministériel plaçant M. **Lefrou** dans la position statutaire de détachement interviendra ultérieurement.

Arrêté du 1^{er} février 1968.

M. **Goldberg** Serge, Ingénieur des Ponts et Chaussées, précédemment détaché auprès de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne est reintégré pour ordre dans les cadres de son administration d'origine et mis à la disposition de l'Agence Foncière et Technique de la Région Parisienne en vue d'exercer les fonctions de Directeur de l'Aménagement de la ville nouvelle de Trappes.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968.

Un arrêté interministériel plaçant M. **Goldberg** dans la position statutaire de détachement interviendra ultérieurement.

Arrêté du 1^{er} février 1968.

M. **Vergnes** Albert, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, précédemment Directeur départemental de l'Équipement du Tarn, est nommé chef du Service Régional de l'Équipement pour la Circonscription d'action régionale de Franche-Comté.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} février 1968.

Arrête du 6 février 1968.

M. **Cassoux** Robert, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, précédemment Directeur départemental de l'Équipement des Hautes-Alpes, est nommé Chef du Service Régional de l'Équipement pour la circonscription d'action régionale de Bourgogne en remplacement de M. **Bringer** appelé à d'autres fonctions.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} février 1968.

Arrêté du 13 février 1968.

Il est mis fin, à compter du 1^{er} janvier 1968, à la mission d'Inspection générale de la Comptabilité dans les services des Ponts et Chaussées confiée à M. **Dutilleul**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, appelé à d'autres fonctions.

Arrêté du 13 février 1968.

M. **Dutilleul** Jean, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, est chargé de la mission permanente d'Inspection du Service d'Études techniques des Routes et Autoroutes.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} janvier 1968.

Arrêté du 13 février 1968.

DECISIONS DIVERSES

Par arrêté du Premier Ministre en date du 3 janvier 1968, est nommé chargé de mission à temps partiel auprès du Préfet de la Région Languedoc-Roussillon : M. J.-P. **Galinou**, Ingénieur des Ponts et Chaussées, en remplacement de M. Daniel **Burcq**, Ingénieur des Ponts et Chaussées, appelé à d'autres fonctions.

Le présent arrêté prend effet à partir du 1^{er} novembre 1967.

J.O. du 10 janvier 1968.

Par arrêté du Premier Ministre en date du 3 janvier 1968 sont nommés chargés de mission à temps partiel auprès du Préfet de la Région Midi-Pyrénées :

A compter du 1^{er} octobre 1967 : M. Bernard **Legrand**, Ingénieur des Mines, en remplacement de M. Robert **Pistre**, Ingénieur des Mines appelé à d'autres fonctions.

A compter du 1^{er} novembre 1967 : M. Jacques **Marvillet**, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

J.O. du 10 janvier 1968.

Par arrêté du Premier Ministre, en date du 3 janvier 1968 :

M. Philippe **Saint-Raymond**, Ingénieur des Mines, est nommé chargé de mission à temps partiel auprès du Préfet de la région Pays de la Loire, en remplacement de M. Pierre **Woltner**, Ingénieur des Mines, appelé à d'autres fonctions.

M. Jean **Eon**, Ingénieur des Ponts et Chaussées, est nommé chargé de mission à temps plein auprès du Préfet de la région Pays de la Loire, en remplacement de M. Jean **Savel**, Ingénieur des Ponts et Chaussées, appelé à d'autres fonctions.

Le présent arrêté prend effet à compter du 1^{er} octobre 1967.

J.O. du 10 janvier 1968

Par arrêté du Premier Ministre en date du 3 janvier 1968 :

Est nommé chargé de mission à temps partiel auprès du Préfet de la région Provence - Côte d'Azur - Corse : M. Jacky **Ferchaux**, Ingénieur des Mines.

Le présent arrêté prend effet à compter du 1^{er} octobre 1967.

Par arrêté en date du 5 janvier 1968, sont nommés au Comité de Bassin Adour-Garonne :

En qualité de représentants de l'Administration :

Délégué du Ministre de l'Intérieur :

M. **Gaudel**, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, adjoint au Chef du Service technique de la Direction générale des Collectivités locales, en remplacement de M. **Lalanne**.

Délégué du Ministre de l'Industrie :

M. **Vincotte**, Ingénieur Général des Mines, en remplacement de M. **Colot**.

J.O. du 17 janvier 1968.

Par arrêté en date du 5 janvier 1968 :

Le Conseil d'administration de l'Agence Foncière de Bassin Adour-Garonne est composé de la façon suivante :

Représentation de l'Etat :

M. **Gaudel**, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, adjoint au Chef de service technique de la Direction générale des Collectivités locales.

M. **Vincotte**, Ingénieur Général des Mines.

J.O. du 17 janvier 1968.

Par arrêté du 11 janvier 1968, M. **Coquand**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, Président de la 5^e section du Conseil général des Ponts et Chaussées, a été nommé vice Président de la Commission centrale des automobiles et de la circulation générale en remplacement de M. **de Buffevent**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, Président de la 4^e section du Conseil général des Ponts et Chaussées.

J.O. du 25 janvier 1968.

Par décret en date du 12 février 1968, est nommé membre du Conseil du fonds d'amortissement des charges d'électrification pour une durée de trois ans :

Au titre de délégué du Ministre de l'Industrie :

M. **Lamouroux**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées.

J.O. du 13 février 1968

Par décret en date du 7 février 1968, est nommé membre du Conseil d'administration du Bureau de recherches géologiques et minières, en qualité de représentant du Ministre de l'Équipement et du Logement : M. **Dreyfus** Gilbert, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Directeur des Routes et de la Circulation routière, en remplacement de M. **Coquand** Roger, appelé à d'autres fonctions.

J.O. du 13 février 1968.

M. **Dreyfuss** Gérard Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, est placé en disponibilité pour une période de trois ans éventuellement renouvelable à compter du 1^{er} juillet 1967, en vue d'occuper le poste de Directeur des Etudes et du Développement de la Société Entrepose.

Arrêté du 13 décembre 1967.

M. **Kornblum** Claude, Ingénieur des Ponts et Chaussées, mis à la disposition du Groupe de travail interministériel pour l'Étude du projet du Tunnel sous la Manche, est, en sus de ses fonctions actuelles et à temps partiel, chargé du Groupe d'Études et de Programmation de la Direction départementale de l'Équipement de Seine-Saint-Denis.

Ces dispositions prennent effet à compter du 1^{er} décembre 1967.

Arrêté du 18 décembre 1967.

LES ANNALES DES MINES

Sommaire du mois de Février 1968

M. **Dardalhon** présente dans ce numéro deux études :

— la première rend compte des **accidents par chute de la victime dans les mines, minières et carrières** survenus de 1957 à 1966 en France et en tire des leçons pour l'amélioration de la sécurité ;

— la deuxième est consacrée aux **ceintures de sécurité et aux cordages**.

— Chroniques et divers :

— Statistiques permanentes.

— Chroniques des métaux, minerais et substances diverses.

— Technique et Sécurité Minières.

— Bibliographie.

— Communiqué.

— Données économiques diverses.

mariage

Notre camarade Paul **Pierron**, Ingénieur des Ponts et Chaussées, fait part de son mariage avec Mlle Collette **Barbé**, qui a été célébré le 2 mars 1968 en l'église Saint-Séverin à Paris-5^e.

décès

On nous prie d'annoncer le décès de :

M. André **d'Andon**, Officier de la Légion d'Honneur, Croix de Guerre 14-18, 39-45, Ingénieur Général des Mines en retraite, Directeur Général des Mines domaniales des Potasses d'Alsace, Président Honoraire de la Compagnie Française du Méthane, survenu à Paris, le 29 janvier 1968, après une courte maladie.

M. Jean **Cor**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, survenu le 19 octobre 1967.

M. Jean **Baudelaire**, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, Directeur des Services scientifiques et techniques du Syndicat national des Fabricants de Ciments et Chaux hydrauliques, fait part du décès de sa mère survenu le 8 février 1968.

Des postes convenant à des Ingénieurs des Ponts et Chaussées attirés par la recherche technique sont susceptibles d'être prochainement vacants au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, notamment dans les Services suivants :

- Département des Bétons et Métaux.
- Département des Structures et Ouvrage d'Art.
- Département des Chaussées

Les camarades intéressés peuvent prendre contact avec **Pasquet**, Directeur du LCPC, 58, bd Lefebvre, Paris 15^e - Tel LEC 31 79

Importante Société d'études recherche :

- Ingénieur PC ou Ingénieur Civil — 32 à 38 ans — spécialisé dans urbanisme et travaux urbains
- Ingénieur PC ou Ingénieur Civil des Ponts — 30 à 35 ans — Routier

Adresser curriculum vitae détaillé et prétentions à :
Secrétariat du PCM qui transmettra. »

O F F R E S
D E
P O S T E S

Important bureau d'études recherche :

Deux ingénieurs ou ingénieurs en Chef P.C. (du Corps ou Civil) — 35 à 45 ans — Excellente connaissance de l'Anglais — pour séjour 5 ans aux U.S.A., l'un de spécialité portuaire, l'autre routière.

Adresser curriculum vitae détaillé et prétentions à :
BCEOM, 15 square Max-Hymans, Paris 15^e.

SEIGIC recherche Ingénieur ayant expérience en commandement et direction grands travaux pour études programmation des tâches par calcul électronique. Tel 235 37-18

Important Bureau d'Etude recherche d'urgence Ingénieur ou Ingénieur en chef, éventuellement retraité, pour diriger Mission études de rentabilité de routes. Pays en voie de développement, Anglais ou Espagnol très souhaitable. Détachement courte durée possible.

Appeler SETEC 339 39-19 Poste 306 (M **Feryn**)

Le Directeur Commercial d'une importante entreprise de Travaux Publics, Paris, recherche un adjoint Ingénieur Grande Ecole, 30 ans environ, ayant l'expérience d'importants chantiers de travaux publics

C.V. manuscrit et photo N° 6463, CONFESSE Publ 20, av Opera, Paris 1^{er} q tr