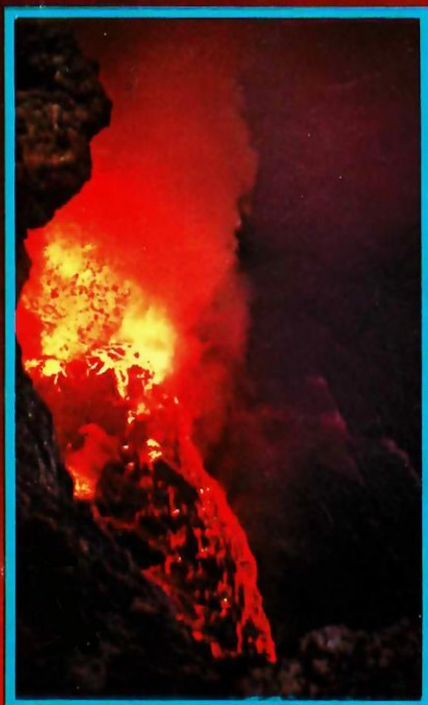




LES NOUVELLES SOURCES D'ÉNERGIE



**PROCHAIN
HORS-SÉRIE**

**SCIENCE
VIE**
et

AVIATION 75



AU SOMMAIRE

- A la conquête des marchés : USA contre Europe R. de NARBONNE
- Naissance du transport aérien (1920-1950) . R. de NARBONNE
- Les incertitudes du transport aérien P. SPARACO
- Le troisième niveau se développe en France C. SOBOL
- L'avion de combat et ses armements J. de GALARD
- Les réseaux d'alerte au sol J. ISNARD
- Spécial Parachutisme J. DUBOURG
- La construction amateur en France M. BATTAREL
- L'industrie française des moteurs J.-P. MITHOIS
- Vol vertical P. LEFORT
- Petits missiles J. ISNARD
- Missiles intercontinentaux J.-P. MITHOIS



HORS-SÉRIE

Publié par
EXCELSIOR PUBLICATIONS, S.A.
5, rue de la Baume - 75008 Paris
Tél. 266.36.20

Direction, Administration, Rédaction

Président : Jacques Dupuy
Directeur général : Paul Dupuy
Directeur administratif et financier : J.-P. Beauvalet
Promotion : Paul Cazenave, assisté d'Elisabeth Drouet
Diffusion ventes : Henri Colney
Rédacteur en Chef : Serge Caudron
Mise en page : Louis Boussange ; Alain Tercinet
Service photo : Daniel Maisto, Miltos Toscas,
J.-P. Bonnin

Correspondants

New York : Arsène Okun, 64-33-99th Street
Rego Park - N. Y. - 11 374
Londres : Louis Bloncourt - 38, Arlington Road
Regent's Park - London W 1

Publicité :

Excelsior Publicité - Interdeco
167, rue de Courcelles
Chef de publicité : Hervé Lacan
Compte Chèque Postal : 91.07 PARIS
Adresse télégraphique : SIENVIE PARIS

A NOS ABONNÉS

● Pour toute correspondance relative à votre abonnement, envoyez-nous l'étiquette collée sur votre dernier envoi.

Elle porte tous les renseignements nécessaires pour vous répondre

● Changements d'adresse : veuillez joindre à votre correspondance, 1,50 F en timbres-poste français ou règlement à votre convenance.

A NOS LECTEURS

● Nos Reliures :

Destinées chacune à classer et à conserver 6 numéros de SCIENCE ET VIE, peuvent être commandées par 2 exemplaires au prix global de 20 F franco. (Pour les tarifs d'envois à l'étranger, veuillez nous consulter.)

Règlement à votre convenance à l'ordre de SCIENCE ET VIE adressé en même temps que votre commande : 5, rue de la Baume, 75008 PARIS.

● Notre Service Livre

Met à votre disposition les meilleurs ouvrages scientifiques parus. Vous trouverez tous renseignements nécessaires à la rubrique : « La Librairie de SCIENCE ET VIE ».

● Les Numéros déjà parus

La liste des numéros disponibles vous sera envoyée sur simple demande à nos bureaux, 5, rue de la Baume, 75008 PARIS.

Pour vous abonner

Nos tarifs

	France et ZF	Etranger
1 AN : 12 N ^{os}	64 F	80 F
1 AN : 12 N ^{os} + 4 H.S.	89 F	110 F
2 ANS : 24 N ^{os}	120 F	152 F
2 ANS : 24 N ^{os} + 8 H.S.	170 F	210 F

Nos correspondants étrangers

BENELUX : PIM Services, 10, bd Sauvinère, 4000 LIEGE (Belgique). C.C.P. 283.76 LIEGE

1 AN : 500 FB

1 AN + 4 H.-Série : 650 FB

CANADA : PERIODICA, 7045 Av. du Parc, MONTREAL 303 - QUEBEC

1 AN : \$ 18

1 AN + 4 H.-Série : \$ 24.

SUISSE : NAVILLE et Cie - 5-7, rue Levrier, 1211 GENEVE 1 (Suisse)

1 AN : 45 FS

1 AN + 4 H.-Série : 60 FS

● RECOMMANDES ET PAR AVION : Nous consulter

Règlements

A l'ordre de SCIENCE et VIE.

Etranger : mandat international ou chèque bancaire payable à Paris.

Bulletin d'abonnement

Je désire m'abonner à **SCIENCE ET VIE** pour :

1 AN ☐ 1 AN + HORS-SERIE ☐

2 ANS ☐ 2 ANS + HORS-SERIE ☐

A COMPTER DU NUMERO DE

NOM | | | | | | | | | | | | | | | |

PRENOM | | | | | | | | | | | | | | | |

ADRESSE | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |

CODE | | | | | VILLE | | | | | | | |

J'adresse le présent bulletin à SCIENCE et VIE, 5, rue de la Baume, 75008 PARIS.

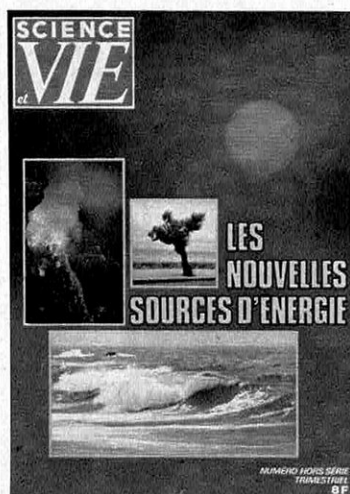
Je joins mon règlement de F
par Chèque bancaire ☐, Mandat lettre ☐,
par C.C.P. 3 volets (sans n° de compte) ☐

A l'ordre de SCIENCE ET VIE.

☐ Je préfère que vous m'envoyiez une facture.

Signature

LES NOUVEL



Notre couverture :
photos
Constantin Flegas,
Roger Bellone,
Menard-Fotogram,
Rémy Poinot.

A compter de ce numéro
« Les nouvelles sources d'énergie »,
Science et Vie Hors-Série
passe à 8 francs.
Les très lourdes charges
pesant sur la presse
justifient en partie cette augmentation.
En partie seulement,
car notre but essentiel est
d'offrir à nos nombreux lecteurs
un « produit » de qualité plus haute.
Notre effort portera, au premier plan,
sur la qualité du papier, qui permettra
une meilleure mise en valeur
de l'illustration
comme du contenu rédactionnel.
Nous espérons ainsi mieux répondre
à l'attente d'un public soucieux
d'acquérir une vue synthétique
des grands problèmes
scientifiques où techniques actuels.



LES SOURCES D'ÉNERGIE

Le pétrole: jusqu'à quand ? p. 4

Un bilan des ressources mondiales en pétrole et en gaz

par Michel Grenon

Les nouvelles ressources de pétrole p. 18

Gisements offshore, pétrole « profond », pétrole arctique, gisements des schistes et des sables...

par Yvonne Rebeyrol

Le nucléaire d'après-demain p. 34

Au-delà du nucléaire « classique », les espoirs des surrégénérateurs et de la fusion contrôlée

par Jérôme Pietrazik

L'hydroélectrique p. 52

Les barrages peuvent-ils apporter une solution à la pénurie d'énergie ?

par Luc Fellot

Un nouveau départ pour le charbon ? p. 64

Les possibilités du plus traditionnel de nos combustibles ne sont pas les mêmes partout

par Alain Ledoux

La géothermie p. 78

Les eaux chaudes et la vapeur tirées du sol connaissent déjà d'importantes applications

par Yvonne Rebeyrol

L'énergie solaire p. 102

Elle convient surtout à l'alimentation d'installations ou de maisons isolées

par Marie-Jeanne Husset

L'économie à l'hydrogène p. 118

Vers l'an 2000, l'hydrogène tiré de l'eau des océans pourrait sérieusement concurrencer les combustibles usuels

par Marie-Jeanne Husset

L'énergie éolienne p. 132

Essentiellement fluctuante, elle pose un gros problème de stockage

par Daniel Paseri

Les énergies de la mer p. 146

En plus des marées, l'énergie des courants marins et de la houle pourrait être captée avec profit

par Annie Humbert-Droz

Et des textes complémentaires ...

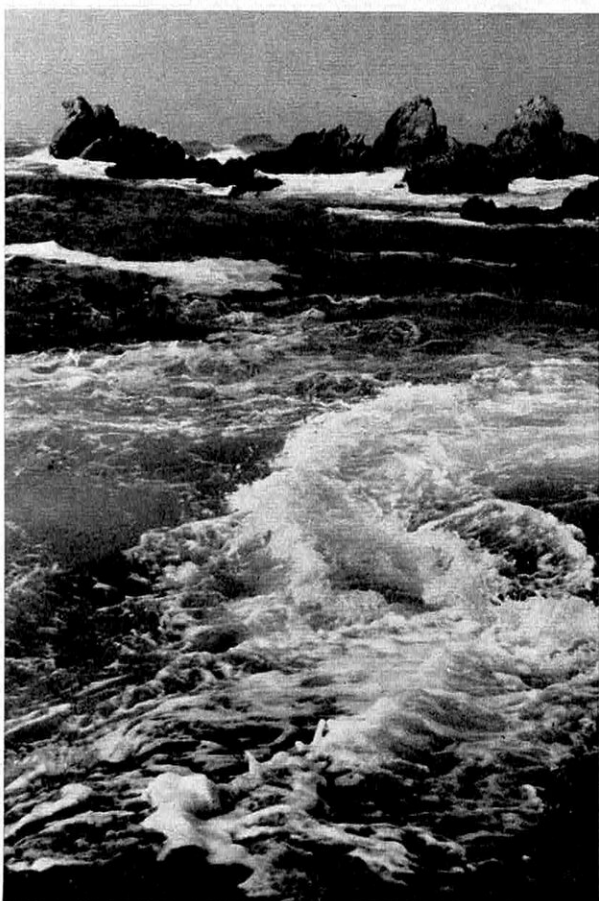
A la recherche des calories perdues (p. 74)

Les possibilités de la magnétohydrodynamique (p. 98)

Des solutions d'avenir pour l'automobile (p. 128)

Energie et récupération des déchets (p. 142)

Les piles à combustibles (p. 156)



LE PÉTROLE: JUSQU'A QUAND ?

L'économie mondiale dépend pour la plus large part des hydrocarbures, sous forme de pétrole et de gaz naturel. Les deux tiers de l'énergie consommée dans le monde en proviennent. Le pétrole a d'ailleurs la place la plus importante (rapport de 2 à 1 avec le gaz). Si on considère isolément

Le port pétrolier du Havre.



l'Europe occidentale, on constate même que sa dépendance vis-à-vis des hydrocarbures dépasse la moyenne mondiale, avec un rôle réduit de moitié pour le gaz naturel. Quels que soient les problèmes posés par la montée de leurs prix, les produits pétroliers seront longtemps indispensables.

● La situation actuelle présente une grande inertie, et les pourcentages donnés ci-dessus ne pourront varier que lentement. Les énergies nouvelles, quelles qu'elles soient (nucléaire, la plus développée actuellement ; solaire, la plus prometteuse peut-être à long terme ; fusion thermonucléaire, la plus problématique, etc.), ne pénétreront que lentement sur le marché de l'énergie. Jusqu'à la fin du siècle, et même probablement au-delà, nos économies dépendront encore fortement des hydrocarbures.

Mais y en aura-t-il assez « pour tout le monde », et nous autres Européens, en recevrons-nous pour nos besoins ? Autrement dit, les réserves sont-elles suffisantes, et le pétrole arrivera-t-il jusqu'aux utilisateurs qui en ont besoin ?

Les deux problèmes, bien que de natures différentes (l'un géologique, et l'autre politique, en schématisant), ne sont d'ailleurs pas indépendants : il est évident que des réserves mondiales importantes, représentant par exemple une centaine d'années de la consommation actuelle au lieu des 30 aujourd'hui connues, et réparties de façon plus « uniforme » dans le monde, changeraient les données politiques du problème.

Même pour le seul Moyen-Orient, si les réserves y étaient multipliées par 3 ou par 5, la politique des Etats producteurs s'en trouverait sans doute modifiée, car leur crainte de voir s'épuiser trop vite leurs ressources pétrolières — qui sont souvent d'ailleurs leurs seules ressources — pourrait s'atténuer.

Il apparaît donc qu'un problème fondamental pour toute prospective énergétique soit une bonne connaissance du « capital » pétrole et gaz naturel dont on peut espérer disposer à l'échelle mondiale et aux niveaux régionaux. Or, il faut bien reconnaître que cette connaissance fondamentale, nous ne l'avons pas ; et nous sommes même très loin de l'avoir. Pourquoi ? Parce que les gouvernements — aussi bien des pays producteurs que consommateurs — ont laissé cette question entre les mains des sociétés pétrolières internationales ⁽¹⁾.

La recherche des hydrocarbures est coûteuse ; c'est une opération pleine de risques, et que les compagnies doivent financer avec leurs fonds propres. Elles n'ont donc pas intérêt à en faire plus qu'il n'en faut pour établir un planning de développement à long terme. C'est ainsi que, dans la profession, on a généralement cherché à maintenir un volant ou, comme on dit, un *rapport réserves sur production* de l'ordre d'une trentaine d'années. Mais ce qui est sage pour une compagnie industrielle peut n'être pas suffisant pour les nations, qui doivent orienter leurs économies avec une vision sur le très long terme, fût-elle imprécise.

Nous n'avons donc pas, semble-t-il, une connaissance suffisante des réserves et des ressources d'hydrocarbures ⁽²⁾. Mais avant d'aller plus loin, il faut préciser un peu ce qu'on entend effectivement par réserves et par ressources, c'est-à-dire faire un peu de « méthodologie ».

Réserves et ressources

D'après la définition de la Conférence mondiale de l'énergie (dont la première réunion a eu lieu à Detroit en septembre 1974), les *ressources* de matières premières non-renouvelables, dans le sens le plus large du terme, représentent la quantité totale disponible dans le sol et susceptible d'être exploitée avec succès et utilisée par l'homme dans un avenir prévisible. Les *réserves*, par contre, sont la fraction correspondante des ressources qui a été mesurée avec soin et que l'on suppose exploitable dans un pays ou une région particulière *dans les conditions économiques locales actuelles et en utilisant la technologie disponible*.

(1) Ceci n'est pas une attaque contre les compagnies pétrolières qui, à notre avis, ont bien fait leur travail. Ce serait plutôt une critique à l'égard des gouvernements qui, apparemment, ont moins bien fait le leur...

(2) Les ressources en charbon sont relativement mieux connues, et plus abondantes, comme on sait : quelque mille ans de la production actuelle, contre une trentaine pour le pétrole.

Il continue d'ailleurs de régner une grande confusion dans la définition des ressources et des réserves d'énergie au plan mondial, à cause d'héritages historiques, et il faut donc toujours considérer les tableaux synthétiques avec une certaine prudence.

Une classification intéressante a été proposée par Brobst, de l'US Geological Survey, distinguant entre les réserves et les ressources potentielles. Les réserves elles-mêmes comprennent les réserves prouvées, qui ont été reconnues de façon certaine, entre autres par des forages (ce que les Américains marquent bien en parlant de réserves forées) ; ce sont en général les seules qu'on utilise au point de vue économique. A ces réserves prouvées, on ajoute les réserves probables (qui peuvent résulter de l'extension non encore délimitée d'un gisement connu, ou de l'amélioration attendue du *facteur de récupération*) et les réserves possibles qu'on suppose exister dans une zone géologiquement connue.

Dans le schéma de Brobst, les ressources conditionnelles, sont des ressources connues au même titre que les réserves, mais qu'il n'est pas rentable d'exploiter dans les conditions actuelles.

En principe, quand les prix augmentent — comme ils l'ont fait de façon spectaculaire depuis octobre 1973 — de nouvelles tranches de réserves deviennent disponibles. Ce phénomène d'addition peut être important, bien qu'on en ignore l'ampleur. En Mer du Nord, par exemple, il est bien connu que certains gisements qu'on ne pouvait exploiter quand le pétrole valait environ 3 dollars le baril deviennent exploitables quand il « vaut » 10 à 12 dollars.

Brobst distingue enfin, pour les ressources non découvertes : les ressources hypothétiques

dans des régions géologiques connues, et les ressources spéculatives dans des régions géologiques non encore explorées.

Il serait extrêmement intéressant, pour toute stratégie énergétique mondiale, entre autres pour déterminer le rythme de substitution des nouvelles énergies au pétrole et au gaz, de connaître le montant total, ultime, des ressources d'hydrocarbures. Peut-être sera-ce prochainement un objectif international. Mais en attendant, divers chercheurs, utilisant des méthodes différentes (méthodes statistiques, méthodes d'analogies géologiques, etc.) ont procédé à des estimations.

Depuis une dizaine d'années, on constate d'ailleurs une certaine convergence des estimations, comme le montre le tableau I.

ESTIMATION DES RESSOURCES ULTIMES DE PETROLE DANS LE MONDE (10⁹ t)

Année	Auteur	Estimation
1967	Ryman (Esso)	300
1968	Hendricks (USGS)	350
1968	Groupe Shell	260
1969	King Hubbert (USGS)	200-300
1969	Weeks	315
1970	Moody (Mobil)	260
1971	Warman (BP)	170-290
1973	U.S. Geological Survey	185-1840(?)

Les réserves *prouvées* actuellement connues étant de l'ordre de 100 milliards de tonnes, les ressources ultimes seraient donc deux à trois fois plus importantes. Vu l'intérêt de ce facteur, on peut espérer que des efforts nombreux seront faits dans ce domaine au cours des prochaines années.

Pour en terminer avec la méthodologie des *réserves*, on peut encore signaler la classification

Parmi les pétroliers lourds, la catégorie la mieux représentée est actuellement celle des 200 - 300 000 tonnes.



de Tussing selon les coûts d'exploitation, coûts qu'il faut bien distinguer des prix pratiqués (qui rajoutent aux coûts de production, parfois très faibles comme au Moyen-Orient — 10 à 15 cents par baril — des redevances, impôts et bénéfices pour arriver aux 10-12 dollars actuels). Les trois classes de Tussing sont respectivement :

- Classe 1 : coût de production inférieur à 2 dollars par baril (dollars 1974). Cette classe est dominée par les champs super-géants (comme Ghawar en Arabie Séoudite, de près de 10 milliards de tonnes à lui tout seul !). Ces champs super-géants représentent *la part la plus importante* des réserves connues. Ils sont concentrés au Moyen-Orient, plus quelques autres répartis dans le monde, comme Prudhoe Bay en Alaska, ou l'est des Shetland en mer du Nord.

- Classe 2 : coût de production entre 2 et 5 dollars par baril. Ces champs sont les plus nombreux, les plus largement répartis et les plus vite exploités (majorité des champs américains entre autres), mais leurs réserves totales sont nettement inférieures à celles de la classe 1. Il faut sans cesse en chercher de nouveaux.

- Classe 3 : coût de production supérieur à 5 dollars par baril. Ces ressources présentent une grande variété et leur potentiel est très important. On y inclut par exemple : l'« huile » laissée dans le sol après exploitation des gisements des classes 1 et 2, les champs de gaz naturel géants mais très éloignés des marchés de consommation, les gisements d'hydrocarbures solides (huiles lourdes de l'Orénoque, schistes bitumineux des Montagnes Rocheuses, sables de l'Athabasca), etc.

Il semble bien qu'au cours des prochaines décennies, nous ayons à choisir entre les ressources

de la classe 1 (avec quelque incertitude politique) et les ressources de la classe 3, coûteuses en investissements et en main-d'œuvre, et qui posent généralement des problèmes graves du point de vue de l'environnement.

La distribution mondiale des ressources

Nous entendons parler maintenant des réserves prouvées. Immédiatement se pose la question : quelles statistiques choisir ? Car plusieurs organismes publient leurs propres statistiques, mais partent parfois de définitions différentes, ou utilisent des méthodes d'estimation et de recoupement différentes. Parmi les statistiques faisant autorité, on peut citer celles, annuelles, de World Oil (utilisées généralement par l'ONU), de l'Oil and Gas Journal (qui incluent aux réserves de pétrole les réserves de liquides associés au gaz naturel) et celles de la Conférence mondiale de l'énergie (dernière enquête sur toutes les énergies en 1974 ; enquête précédente en 1968).

Parce qu'elles établissent des comparaisons avec les autres énergies — charbon, schistes, hydraulique, nucléaire — en termes de contenus énergétiques, nous avons retenu ces dernières.

Le tableau en page 8 donne les statistiques détaillées — pays par pays, regroupés en régions et sous régions géographiques — pour les réserves prouvées de pétrole brut, ainsi que la production récente, et le rapport des réserves à la production en années. Le tableau III fournit les renseignements correspondants pour le gaz naturel.

Le tableau IV présente sous forme condensée les parts relatives des réserves de pétrole et de gaz naturel par rapport au total mondial pour les principales grandes régions géographiques.

Le Latia, 272 000 tonnes, a été construit par les Chantiers de l'Atlantique.



TABLEAU II

STATISTIQUES MONDIALES POUR LE PÉTROLE

(d'après Conférence Mondiale de l'Energie - 1974)

Pays et/ou Région	Réserves prouvées récupérables (millions de tonnes)	Production 1972 (millions de tonnes)	Réserves Production (années)	Pays et/ou Région	Réserves prouvées récupérables (millions de tonnes)	Production 1972 (millions de tonnes)	Réserves Production (années)
AFRIQUE	12 848	272,4	47	Autriche	26	2,5	10
<i>Afrique Occidentale</i>				<i>France</i>	<i>9,1</i>	<i>1,484</i>	<i>6,2</i>
Dahomey	0,1	0	—	<i>Pays-Bas</i>	<i>37</i>	<i>1,6</i>	<i>23</i>
Ghana	0,1	0	—	<i>Allemande</i>	<i>53</i>	<i>7,098</i>	<i>7,5</i>
Nigéria	1 154,8	84,68	14	<i>Europe du Sud</i>	<i>128,1</i>	<i>5,92</i>	<i>22</i>
<i>Afrique Centrale</i>	<i>941,6</i>	<i>13,82</i>	<i>68</i>	<i>Albanie</i>	<i>13,96</i>	<i>1,51</i>	<i>9,2</i>
Angola	49,4	7,0	7	<i>Espagne</i>	<i>10,93</i>	<i>0,14</i>	<i>78</i>
Congo	674	0,369	1 826	<i>Italie</i>	<i>6,6</i>	<i>1,17</i>	<i>5,6</i>
Gabon	150	6,23	24	<i>Yougoslavie</i>	<i>96,6</i>	<i>3,1</i>	<i>31</i>
Zaïre	68,2	0,22	310	<i>Europe du Nord</i>	<i>766,6</i>	<i>0,26</i>	<i>2 948</i>
<i>Afrique du Nord</i>	<i>10 751</i>	<i>173,9</i>	<i>63</i>	<i>Danemark</i>	<i>34,75</i>	<i>0,18</i>	<i>193</i>
Algérie	5 977	51,6	116	<i>Norvège</i>	<i>228,3</i>	<i>—</i>	<i>—</i>
Egypte	713,4	11,4	62	<i>Royaume-Uni</i>	<i>503,6</i>	<i>0,08</i>	<i>6 295</i>
Libye	4 002	107,1	37	<i>Europe de l'Est</i>	<i>373,9</i>	<i>18,57</i>	<i>22</i>
Maroc	0,2	0,026	8	<i>Bulgarie</i>	<i>37,9</i>	<i>0,334</i>	<i>113</i>
Tunisie	58,7	3,8	15	<i>Hongrie</i>	<i>130,9</i>	<i>1,92</i>	<i>68</i>
ASIE (sans URSS)	59 972	1 021	53	<i>Pologne</i>	<i>8,0</i>	<i>0,347</i>	<i>23</i>
<i>Asie Orientale</i>	<i>1 729</i>	<i>29,1</i>	<i>59</i>	<i>Rép. Dém. Allemande</i>	<i>1,52</i>	<i>0,06</i>	<i>25</i>
Chine populaire	1 726	29,0	60	<i>Roumanie</i>	<i>193,8</i>	<i>13,71</i>	<i>14</i>
Chine (Formose)	2,955	0,139	21	<i>Tchécoslovaquie</i>	<i>1,77</i>	<i>0,2</i>	<i>8,8</i>
Japon	3,57	0,708	5	URSS	8 138	394	21
<i>Asie Centrale et du Sud</i>	<i>9 017</i>	<i>263,2</i>	<i>34</i>	AMERIQUE	19 715,30	1 781,76	11,07
Afghanistan	12,65	0,01	1 265	<i>Amérique du Nord</i>	<i>7 058</i>	<i>528,72</i>	<i>13</i>
Inde	130,16	7,374	18	<i>Canada</i>	<i>1 075</i>	<i>69,41</i>	<i>15</i>
Iran	8 870	255,36	35	<i>Etats-Unis</i>	<i>5 569</i>	<i>436,15</i>	<i>13</i>
Pakistan	4,52	0,454	10	<i>Mexique</i>	<i>414,13</i>	<i>23,6</i>	<i>17</i>
<i>Asie du Sud-Est</i>	<i>1 855</i>	<i>72,53</i>	<i>26</i>	<i>Caraïbes</i>	<i>5 058,30</i>	<i>1 034,76</i>	<i>—</i>
Brunéi	198,8	13,36	15	<i>Barbades</i>	<i>0,107</i>	<i>0</i>	<i>—</i>
Burma	5,4	0,98	5,5	<i>Cuba</i>	<i>1,35</i>	<i>0,192</i>	<i>7</i>
Indonésie	1 456	53,9	27	<i>Trinité et Tobago</i>	<i>285</i>	<i>7,44</i>	<i>38</i>
Malaisie	194,6	4,46	44	<i>Amérique du Sud tropicale</i>	<i>7 239</i>	<i>194,6</i>	<i>37</i>
Thaïlande	0,055	0,01	5,5	<i>Bolivie</i>	<i>25</i>	<i>1,46</i>	<i>17</i>
<i>Asie du Sud-Ouest</i>	<i>41 367</i>	<i>655,3</i>	<i>63</i>	<i>Brésil</i>	<i>106,53</i>	<i>8,158</i>	<i>13</i>
Arabie Séoudite	18 727	300,7	62	<i>Colombie</i>	<i>126,2</i>	<i>9,91</i>	<i>13</i>
Bahrein	70,1	3,5	20	<i>Equateur</i>	<i>786,8</i>	<i>3,77</i>	<i>209</i>
<i>Emirats Arabes Unis</i>	<i>3 033</i>	<i>54,9</i>	<i>55</i>	<i>Peru</i>	<i>101,1</i>	<i>2,96</i>	<i>34</i>
Irak	4 437	72,1	62	<i>Venezuela</i>	<i>6 093</i>	<i>168,3</i>	<i>36</i>
Israël	1,97	0,042	47	<i>Amérique du Sud tempérée</i>	<i>360</i>	<i>23,68</i>	<i>15</i>
Koweït	10 188	151	67	<i>Argentine</i>	<i>344,4</i>	<i>22</i>	<i>16</i>
Oman	682,3	13,9	49	<i>Chili</i>	<i>15,6</i>	<i>1,68</i>	<i>10</i>
Qatar	916,1	21,5	43	OCEANIE	228,9	15,4	15
Syrie	1 040	6,28	166	<i>Australie</i>	<i>197,2</i>	<i>15,4</i>	<i>13</i>
Turquie	19,5	3,38	5,8	<i>Nouvelle-Zélande</i>	<i>31,75</i>	<i>0</i>	<i>—</i>
Zone Neutre	2 252	28	80	TOTAL MONDIAL	91 525	2 493	37
EUROPE	1 394	35,43	39				
<i>Europe de l'Ouest</i>	<i>125,2</i>	<i>12,68</i>	<i>9,9</i>				

On y retrouve le rôle primordial du Moyen-Orient pour le pétrole et la part très importante de l'URSS pour le gaz naturel.

Par grandes régions, on peut faire les commentaires suivants.

Afrique. La plus grande partie du continent africain est géologiquement défavorable à l'accumulation de pétrole et de gaz naturel ; mais quand il y a des accumulations, elles sont très abondantes. C'est le cas en Afrique du Nord, en Algérie et en Libye, qui détiennent plus de 80 % des réserves connues de tout le continent. Les régions côtières et le plateau continental de l'Afrique centrale et occidentale ont des réserves de pétrole brut et de gaz naturel dont la mise en valeur est relativement récente ; on considère

parfois que ce plateau continental pourrait être une des zones les plus importantes pour l'avenir. Le Nigeria occupe actuellement en Afrique la deuxième place de producteur après la Libye.

Depuis un an, des activités de recherche ont démarré en Egypte.

Comme le montre le tableau IV, le continent africain possède environ 14 % des réserves mondiales prouvées de pétrole brut, et 10 % des réserves de gaz naturel. La demande intérieure y est encore très faible et ne rejoindra sans doute pas avant longtemps les niveaux de production. Le pétrole brut et le gaz d'Afrique (relativement proches d'ailleurs de l'Europe du point de vue géographique), continueront donc à être d'importants facteurs dans le commerce international.

TABLEAU III
STATISTIQUES MONDIALES POUR LE GAZ NATUREL
(d'après Conférence Mondiale de l'Energie - 1974)

Pays et/ou Région	Réserves prouvées récupérables (en 10 ⁹ m ³)	Production 1972 (en 10 ⁹ m ³)	Réserves Production (années)	Pays et/ou Région	Réserves prouvées récupérables (en 10 ⁹ m ³)	Production 1972 (en 10 ⁹ m ³)	Réserves Production (années)
AFRIQUE	5 709	38,82	147	Allemagne (R.F.A.)	350	17,69	20
<i>Afrique Occidentale</i>	1 248,7	15,71	79	<i>Autriche</i>	16,12	1,963	8,2
Nigéria	1 248,7	15,71	79	<i>France</i>	136	10,64	13
<i>Afrique Orientale</i>	72,4	0	—	<i>Pays-Bas</i>	1 967,5	58,6	34
Mozambique	72,4	0	—	<i>Europe du Sud</i>	233,7	15,29	15
<i>Afrique Centrale</i>	369	1,30	306	<i>Albanie</i>	9	—	—
Angola	0,012	1,088	—	<i>Espagne</i>	0,65	0,0017	382
Cameroun	0,4	0	—	<i>Grèce</i>	0,08	0	—
Congo (Rép. Pop.)	142	0,0025	56 800	<i>Italie</i>	166	14,187	12
Gabon	198	0,091	2 176	<i>Yougoslavie</i>	57,944	1,1	53
Zaïre	29	0,119	244	<i>Europe du Nord</i>	1 354	26	52
<i>Afrique du Nord</i>	4 008	21,81	184	<i>Danemark</i>	51	0	—
Algérie	2 973	3,053	974	<i>Norvège</i>	432,8	0	—
Libye	779	14,05	55	<i>Royaume-Uni</i>	870	26	33
Maroc	0,5	0,034	15	<i>Europe de l'Est</i>	455,5	49,34	9,2
Egypte	213	4,554	47	<i>Allemagne (Rép. Dém.)</i>	15	5,4	2,8
Tunisie	42,6	0,119	358	<i>Bulgarie</i>	29	0,45	64
<i>Afrique australe</i>	11,3	0	—	<i>Hongrie</i>	84,9	3,625	23
<i>Afrique du Sud</i>	11,3	0	—	<i>Pologne</i>	141,6	5,84	24
ASIE	12 241	151,2	81	<i>Roumanie</i>	170	33,12	5,1
<i>Asie Orientale</i>	709	22,3	32	<i>Tchécoslovaquie</i>	15	0,907	16
Chine (Rép. Pop.)	680	21,0	32	URSS	17 136	212	81
Chine (Formose)	28,63	1,304	32	AMERIQUE	12 240	803,37	14,3
Japon	11	2,5	4,4	<i>Amérique du Nord</i>	10 132	710,6	14
<i>Asie Centrale et du Sud</i>	6 653	49,23	135	<i>Canada</i>	2 576	73,11	35
Afghanistan	141,6	2,665	53	<i>Etats-Unis</i>	7 556,5	637,5	12
Bangladesh	235	0,60	392	<i>Amérique Centrale</i>	304,5	18,7	16
Inde	66,27	1,565	42	<i>Mexique</i>	304,5	18,7	16
Iran	5 664	40,48	140	<i>Caribbes</i>	212,4	3,55	60
Pakistan	546	3,92	139	<i>Barbades</i>	—	0,0036	—
<i>Asie du Sud-Est</i>	648,3	7,669	84	<i>Trinité et Tobago</i>	212,4	3,546	60
Brunéi	284	3,4	84	<i>Amérique du Sud</i>	—	—	—
Barma	2,8	0,102	27	<i>Tropicale</i>	1 259	54,43	23
Indonésie	73,4	4,165	40	<i>Bolivie</i>	141,6	3,053	46
Malaisie	283	0	—	<i>Brésil</i>	35,804	1,242	29
Philippines	5,1	0	—	<i>Colombie</i>	54,94	3,936	14
Timor (Port.)	—	0,002	—	<i>Equateur</i>	122	0,15	813
<i>Asie du Sud-Ouest</i>	4 220	69,47	61	<i>Pérou</i>	84,9	0,032	2 653
Arabie Séoudite	1 540	31,17	49	<i>Venezuela</i>	819,8	46,02	18
Bahrain	141,6	1,247	114	<i>Amérique du Sud Tempérée</i>	331,5	16,4	20
Emirats Arabes Unis	368,1	11,37	32	<i>Argentine</i>	189,9	8,072	23
Irak	566	0,097	5 838	<i>Chili</i>	141,6	8,073	17
Israël	1,57	0,123	13	OCEANIE	693,5	3,73	186
Koweït	1 090	17,1	64	<i>Australie</i>	534,2	3,375	158
Oman	49,6	0,609	81	<i>Mélanésie/Nouvelle Guinée</i>	34	0	—
Qatar	226,5	5,3	43	<i>Nouvelle-Zélande</i>	159,3	0,354	450
Syrie	19,8	—	—	TOTAL MONDIAL	52 532	1 389	38
Turquie	4,24	—	—	<i>1971.</i>	—	—	—
Zone Neutre	212,4	2,45	87	<i>1970.</i>	—	—	—
EUROPE	4 513	179,5	25	<i>Généralement, les statistiques de la CME considèrent 1 000 m³ GN = 0,85 tonne pétrole brut.</i>	—	—	—
<i>Europe de l'Ouest</i>	2 470	88,9	28				

Asie (à l'exclusion de l'URSS). La région la plus riche, la plus prolifique peut-on dire, est naturellement le Golfe Arabo-Persique, qui couvre actuellement près de 40 % des besoins mondiaux en pétrole brut (avec 55 % des réserves mondiales). La production de gaz naturel ne représente pour l'instant que 8 % du total mondial, dont un tiers environ pour l'Iran, mais cette activité est en pleine expansion avec le développement des moyens logistiques (pipe-lines et moyens de transports cryogéniques).

La grande augmentation récente des réserves et de la production pour l'Asie orientale est due d'abord aux nouvelles découvertes et à un accroissement de la production de « brut » en République populaire de Chine. Bien que les

informations provenant de ce pays soient rares, il semble que la production y soit passée de 10,5 millions de tonnes par an en 1967 à 29 millions de tonnes en 1972 et à 50 millions en 1973 ; les ressources totales connues ont été estimées à 5 milliards de tonnes, pouvant atteindre 10 milliards.

Dans l'Asie du Sud-Est, des explorations au large des côtes de Brunéi et de l'Indonésie ont fait découvrir d'importants gisements de pétrole et de gaz.

Europe (à l'exclusion de l'URSS). La plus grande partie de la surface des terres européennes a été explorée pour rechercher du pétrole et du gaz, et les perspectives d'y faire de nouvelles découvertes ne sont pas encourageantes. C'est

TABLEAU IV RÉPARTITION MONDIALE DES RÉSERVES PROUVÉES RÉCUPÉRABLES DE PÉTROLE BRUT ET DE GAZ NATUREL

(d'après Conférence Mondiale de l'Energie - 1974)

	Pétrole (%)	Gaz (%)
Afrique Occidentale	1,3	2,4
Afrique Equatoriale	1,0	0,7
Afrique du Nord	11,7	7,6
Total Afrique	14,0	10,7
Asie de l'Est	1,9	1,3
Asie Centrale et Sud (incl. Iran)	9,8	12,7
Asie du sud-est	2,0	1,2
Asie du sud-ouest (Moyen-Orient)	45,2	8,0
Total Asie	58,9	23,2
Europe occidentale	0,14	4,7
Europe de l'Est	0,41	0,87
Europe du Nord (a)	0,84	2,6
Total Europe	1,39	8,17
Amérique du Nord	7,2	19,3
Amérique Centrale	0,45	0,58
Amérique du Sud Tropicale	7,9	2,4
Total Amérique	15,55	22,28
URSS	8,9	32,6
Océanie	0,25	1,3
Autres régions (b)	1,01	1,75

(a) Ces statistiques ne comptabilisent pas les estimations les plus récentes en Mer du Nord.

(b) Afrique Orientale et du Sud, Japon, Europe du Sud, Caraïbes et Amérique du Sud tempérée.

pourquoi la recherche a été étendue au large des côtes, où ont été rapidement effectuées de belles découvertes de gaz (au sud-est de l'Angleterre), suivies des découvertes pétrolières d'Ekofisk (1969) dans les eaux norvégiennes, et de la province pétrolière de la Mer du Nord septentrionale.

Indépendamment de la Mer du Nord, réalité d'aujourd'hui, on fonde des espoirs sur la Méditerranée, où des indices encourageants ont été trouvés, mais où la production par grands fonds (de l'ordre de 2 000 m), pose d'énormes problèmes techniques, et en Mer d'Iroise, où les travaux d'exploration pourront commencer dès qu'aura été réglé le problème des frontières avec la Grande-Bretagne. On dit parfois que les conditions géologiques y seraient aussi favorables qu'en Mer du Nord. Il ne faut cependant pas se livrer à un optimisme prématuré, car les conditions géologiques étaient également favorables dans le Golfe de Gascogne et les résultats ont été décevants, malgré des sommes importantes investies.

Amérique. L'Amérique du Nord, complétée par les Caraïbes, le Mexique et le Vénézuéla, a été pendant longtemps le continent pétrolier. Mais aux Etats-Unis, depuis plusieurs années déjà, les nouvelles découvertes compensent à peine (et parfois ne compensent pas), les niveaux de production atteints (de l'ordre de 500 millions de tonnes par an). Les Etats-Unis sont d'ailleurs une des meilleures illustrations de la

Classe 2 de Tussing pour les réserves : les rythmes d'exploitation des gisements par an y oscillent entre 5 et 16 % du montant des réserves, contre 2 % en moyenne pour les réserves de la Classe 1.

Le Canada a un potentiel extrêmement important, mais il s'agit de réserves de la classe 3 (sables asphaltiques de l'Athabasca). Quant aux réserves « fabuleuses » qui auraient été découvertes récemment au Mexique, il est encore trop tôt pour se prononcer.

L'Amérique du Sud tropicale a des gisements de pétrole et de gaz naturel assez importants et constitue un producteur notable. Les réserves les plus importantes (pétrole et gaz), se trouvent pour l'instant au Vénézuéla, dans la région du lac Maracaïbo (80 % des réserves de pétrole du continent sud-américain, et 52 % des réserves de gaz).

Depuis quelques années, l'Equateur a vu son rôle augmenter au point qu'il a pu rejoindre les rangs de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) en 1973.

Dans l'Amérique du Sud tempérée, seuls l'Argentine et le Chili ont des réserves importantes de pétrole brut et de gaz naturel. Certains experts (comme Grossling, de l'US Geological Survey) pensent que le plateau continental argentin est particulièrement prometteur et même, s'abandonnant à leur enthousiasme, imaginent qu'il pourrait être un second Golfe Arabo-persique.

URSS. La vaste étendue de l'Union Soviétique contient des réserves de pétrole brut et de gaz naturel qui suffisent aux besoins du pays encore pour plusieurs années. Des découvertes importantes et récentes dans les régions arctiques de l'URSS asiatique les ont augmentées au point que les réserves prouvées récupérables de pétrole représentent près de 9 % des mondiales, et les réserves de gaz 33 %. On peut d'ailleurs considérer ces estimations comme prudentes, puisque de vastes zones géologiquement favorables, y compris le plateau continental arctique, sont encore quasi-inexplorées.

Par contre, l'exploitation de ces ressources est compliquée par leur éloignement des marchés existants et par les conditions climatiques rigoureuses.

La situation est bien meilleure pour le gaz naturel, en ce qui concerne les réserves, que pour le pétrole. Les statistiques pour ce dernier sont d'ailleurs données au compte-gouttes, et pas toujours cohérentes...

Océanie. Les activités de prospection du pétrole et du gaz naturel y sont relativement récentes, et concentrées autour de l'Australie, de la Nouvelle-Zélande et de la Nouvelle-Guinée ; des découvertes importantes ont été faites dans chaque région, la plus importante étant celle du détroit de Bass en Australie du sud-est. Mais pour l'instant, les réserves ne représentent qu'un pourcentage très faible (environ 0,25 %) du total mondial, et la production ne satisfait pas encore aux besoins intérieurs.



Le chantier du port d'Antifer, qui permettra le déchargement de pétroliers super-géants.

Total mondial. Comme on peut le voir sur le tableau II, les réserves mondiales prouvées de pétrole brut seraient de l'ordre de 90 milliards de tonnes, en augmentation d'au moins 35 milliards de tonnes sur l'estimation précédente de la Conférence mondiale de l'énergie en 1968. L'Asie et l'Afrique ont enregistré les plus fortes augmentations, au contraire des Etats-Unis.

Les activités de recherche sont nombreuses dans le monde, et ont été d'ailleurs stimulées par la flambée des prix. Il est évidemment difficile de prévoir quels en seront les résultats. Mais on peut avoir une idée de l'ampleur de la tâche à accomplir en comparant quelques chiffres :

— les terrains sédimentaires favorables couvrent environ 67,6 millions de kilomètres-carré (incluant les plateaux continentaux jusqu'à des profondeurs de 200 mètres), dont 9 millions (13,3 %) pour l'URSS, 12,7 millions (19 %) pour l'Amérique latine, toutes deux encore peu explorées, comparés aux 3,1 millions de kilomètres carrés (4,6 %) du Moyen-Orient.

Ces terrains ont été très diversement explorés. A titre d'exemple, les Etats-Unis continentaux (48 états contigus) ont été littéralement « percés » de plus de 2,2 millions de trous de forage, soit environ 45 puits par 100 km². L'URSS n'a encore enregistré que 500 000 puits, soit 6 trous par 100 km². Pour l'Amérique du Sud (il en serait de même en Afrique, en Asie, etc...), on n'a foré que 100 000 trous, soit moins de un par 100 km²; et encore, ce chiffre devrait-il être réduit de moitié si on excluait le Vénézuéla, le Mexique et l'Argentine.

Comme on sait, les recherches de pétrole s'orientent de plus en plus vers les plateaux continentaux. La zone actuellement la plus active (en comptant par exemple le nombre de plate-formes en activité, sur un total mondial de 170 en opérations à fin 1973) est la Mer du Nord. On pense qu'au cours des prochaines années, la zone Nord-est du golfe du Mexique (près de la Floride) va également croître en importance, à cause des nombreux permis achetés fin 1973,

TABLEAU V PRINCIPAUX PAYS EXPORTATEURS ⁽¹⁾ DE PÉTROLE BRUT ET DE PRODUITS FINIS (1972)

Pétrole brut millions de tonnes		Produits finis millions de tonnes	
1. Arabie		1. Venezuela	50,3
2. Arabie Séoudite	272	2. Bloc	
3. Iran	235	3. sino-soviét.	43,4
4. Koweït	142	4. Pays-Bas	39,3
5. Libye	116	5. Antilles Néerl.	33,7
6. Venezuela	111	6. Italie	29,8
7. Nigéria	93	7. Trinité	18,2
8. Bloc sino-soviétique	84,5	8. Arabie Séoudite	18,0
9. Irak	75	9. Singapour	17,4
10. Émirats Arabes	62,7	10. Îles Vierges	17,4
11. Algérie	52,1	11. Royaume-Uni	16,6
12. Canada	49,8	12. Koweït	16,2
13. Indonésie	42,7	13. Belgique,	
14. Zone neutre	27,7	14. Luxembourg	14,1
15. Qatar	25,2	15. France	13,5
16. Oman	14,6	16. Iran	12,5
		17. États-Unis	11,6

(1) Inclut également les réexportations. Ceci explique entre autres le rôle à priori surprenant de pays comme les Antilles néerlandaises ou la Trinité, ou encore Singapour, ainsi que le rôle des Pays-Bas en Europe. On retrouve naturellement ces pays sur la liste des importateurs de pétrole brut, sans relation avec leurs consommations domestiques. (D'après les statistiques du Bureau of Mines des États-Unis.)

TABLEAU VI PRINCIPAUX PAYS IMPORTATEURS DE PÉTROLE BRUT ET DE PRODUITS FINIS (1972)

(en millions de tonnes)

Pétrole brut		Produits finis	
1. Japon	214	1. États-Unis	132
2. Italie	126	2. Japon	40,1
3. France	125	3. Allemagne	
4. Royaume-Uni	125	4. fédérale	36,6
5. États-Unis	116	5. Royaume-Uni	20,8
6. Allemagne		6. Suède	19,5
7. Fédérale	109	7. Danemark	12,0
8. Pays-Bas	95,5	8. Bloc	
9. Bloc		9. sino-soviétique	10,6
10. sino-soviétique	60,8	10. France	9,3
11. Canada	41,3	11. Suisse	9,3
12. Espagne	40,9	12. Pays-Bas	9,0
13. Belgique,		13. Belgique,	
14. Luxembourg	38,0	14. Luxembourg	8,1
15. Antilles		15. Canada	7,3
16. Néerlandaises	37,3	16. Singapour	7,2
17. Brésil	25,6	17. Italie	5,8
18. Îles Vierges	21,5	18. Sud Vietnam,	
19. Singapour	20,7	19. Cambodge	5,2

insi que l'immense golfe de Thaïlande (où on a déjà enregistré des découvertes prometteuses), et le plateau s'étendant entre Bornéo et le Vietnam du Sud, où les forages ont commencé récemment (les recherches sismiques auraient révélé des sédiments de 5 000 m d'épaisseur, dans une zone stratigraphiquement favorable). On peut aussi citer la Mer Egée, avec une découverte, le plateau continental égyptien, entre autres la partie prolongeant le Delta du Nil, etc...

Le commerce mondial des produits pétroliers

Quelques pays sont à la fois d'importants consommateurs de pétrole et d'importants producteurs, comme les États-Unis, l'URSS ou le Mexique. Mais beaucoup plus nombreux sont les pays importants consommateurs et faibles producteurs, ou inversement, faibles consommateurs mais importants producteurs. Cette situation dont on a pu apprécier en 1973 et 1974 certains dangers ou inconvénients est illustrée par les tableaux V et VI donnant les principaux pays exportateurs et les principaux pays importateurs de pétrole brut et de produits finis (listes limitées aux quinze premiers dans chaque cas). On peut remarquer que le bloc sino-soviétique est à la fois exportateur de brut et de produits finis et importateur de brut et de produits finis : sa balance totale laisse apparaître un excès exportateur de l'ordre de 57 millions de tonnes.

La liste des pays exportateurs de produits finis fait ressortir le rôle des « réexportateurs », entre autres dans la région des Caraïbes, où de nombreuses compagnies pétrolières américaines ont installé leurs raffineries, pour des raisons fiscales. On peut aussi remarquer que, sauf l'Arabie Séoudite traditionnellement exportatrice de produits finis avec sa raffinerie de Ras Tanura, les pays exportateurs de pétrole brut ne l'étaient généralement pas de produits finis. La situation est en train de changer, comme on sait, avec des projets géants, comme la raffinerie germano-iranienne de Kharg en Iran (25 millions de tonnes par an, plus pétroléo-chimie).

En 1972 (année des plus récentes statistiques mondiales détaillées), le commerce mondial du pétrole brut avait porté sur près de 1,5 milliard de tonnes et celui des produits finis sur près de 500 millions de tonnes. Le pétrole et les produits pétroliers avaient représenté 56,5 % du commerce maritime mondial avec 1 653 millions de tonnes sur 2933.

Pour transporter tout ce pétrole, la flotte mondiale est en continuelle croissance et s'est orientée, depuis la fermeture du canal de Suez, vers les tonnages de plus en plus élevés. Comme le montre le tableau VII, la classe la plus nombreuse est la catégorie des 200 à 300 000 tonnes de port en lourd. Il y avait, mi-1974, 2 navires de plus de 400 000 tonnes en opération (les Globtik London, de 477 000 tonnes de port en lourd) et 70 navires de plus de 400 000 tps en commande, dont les deux de 510 000 tps pour la Shell Française et le navire le plus gros du monde, dépassant 700 000 tonnes (pour la Globtik).

Cependant, on a assisté en 1974 à des changements importants. Le ralentissement de la consommation mondiale de pétrole a induit une certaine crainte d'une surcapacité de tonnage au cours des prochaines années. Les pays producteurs ont également accru leurs commandes de pétroliers, et se trouveront d'ici quelques années en possession d'une flotte de plusieurs millions

TABLEAU VIII - COMMERCE MARITIME MONDIAL DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ

Origine	Destination	Volume annuel en 10 ⁶ m ³	Début des livraisons
Mer du Nord Secteur Norvégien (Groupe Phillips) Secteur Néerlandais (Placid)	RFA, Pays-Bas, Belgique, France (Consortium Grande Alliance) RFA	10 6,5	1975 1975
URSS Vladivostok	Etats-Unis (El Paso - Occidental)	10	—
Algérie Arzew (Camel) Arzew (Camel) Skikda (Sonatrach) Arzew/Skikda (Sonatrach) Skikda (Sonatrach) Arzew/Skikda (Sonatrach) Arzew/Skikda (Sonatrach) Skikda (Sonatrach) Cap Djinet, Alger (Sonatrach) (Sonatrach) (Sonatrach)	Canvey Island, G.-B. (Gas Council) Le Havre (Gaz de France) Fos-sur-Mer (Gaz de France) Boston, USA (Distrigas) Barcelone, Espagne (Gas Natural) USA, Côte est (El Paso) USA, Côte est (Panhandle Eastern Pipeline) USA, Côte est (Eascogas) RFA, Belgique, France, Suisse, Autriche (SAGAPE) RFA (Ruhrgas) Espagne (Empresa Nacional del Gas)	1,0 0,5 3,5 0,4 1,5 10 4,5 6 16,5 10-12 4,5	1964 1965 1972 1972 1974-1979 1975-1976 1979 1975-1976 1977-1978 1979 —
Nigéria (Shell/BP)	USA, Côte est	6,5	—
Abu Dhabi Das Island (BP, CFP, Bridgestone)	Kimitsu, Japon (Mitsui)	3	1975
Iran Kharg Island (NIGC) Queshm (NIGC)	Japon (Itah) Japon (Fuji)	4,5 7-8,5	1976 1977
Libye Marsa el Brega (Esso) Marsa el Brega (Esso) Marsa el Brega (Esso)	Barcelone, Espagne (Catalana de Gas) La Spezia, Italie (ENI) USA, Côte est	1,1 2,4 —	1971 1971 1972
Qatar (Shell, CFP, BP, Esso, Mobil, Bridgestone)	Japon	1,2	1980
Brunéi Lumut (Shell, Mitsubishi)	Tokyo, Japon (Tokyo Gas, Tokyo Electric, Osaka Gas)	7,5	1972-1973
Indonésie (Pertamina)	Japon (Bridgestone)	4,5	—
Sarawak (Shell)	Japon	7	1977
Alaska Cook Inlet (Phillips, Marathon) Cook Inlet (Phillips, Marathon)	Yokohama, Japon (Tokyo Gas) USA, Côte ouest (Pacific Lighting)	1,6 0,2	1969 1972
Trinité (Amoco)	USA, Côte est (People Gas)	7,5	1976-1978
Venezuela Puerto La Cruz (CVP)	USA, Côte est (Philadelphia Gas)	2/4	—
Australie Palm Valley (Magellan Petroleum) Palm Valley (Magellan Petroleum) Nord Ouest (Burmah)	Los Angeles, USA (Pacific Lighting) Japon (Okura Shoji) Japon	5 7,5 6	1977 — 1976

Certains des projets ci-dessus ne sont pas encore fermes et définitifs quant à leurs modalités d'application (d'après CDPD Pétrole 1973).

de tpi, soit indépendamment (comme l'Iran ou le Koweït), soit en groupe (compagnie de navigation de l'Organisation des pays arabes exportateurs de pétrole — OPAEP).

Enfin, on a pu constater en 1974 un ralentissement des commandes de gros navires au profit des navires de plus faible tonnage (inférieur à 100 000 tonnes). Ceci semble correspondre à la réouverture assez prochaine du canal de Suez, et à l'accroissement attendu du commerce des produits finis lié à la construction de raffineries dans les pays producteurs.

Le commerce mondial du gaz naturel se présente d'une façon tout à fait différente. Jusqu'en 1964, seules existaient les possibilités de transports continentaux par gazoducs, et la quasi-totalité du gaz naturel associé au pétrole brut était réinjectée pour maintenir la pression dans le gisement, ou, gaspillage attristant, était simplement brûlée à la torche, sauf dans un petit nombre de pays à la fois producteurs et consommateurs (Etats-Unis, Canada, etc).

En 1964 eut lieu le premier transport maritime commercial de gaz naturel liquéfié, et on peut



**TABEAU VII
FLOTTE PÉTROLIÈRE:
ANALYSE A LA FIN 1974**

Dimensions (tpl)	Navires existants		Navires en commande	
	Nombre	Capacité (x 1 000 tpl)	Nombre	Capacité (x 1 000 tpl)
10 000- 49 999	2 122	55 759	311	8 941
50 000- 99 999	698	48 746	192	15 689
100 000-149 999	168	20 098	197	25 136
150 000-199 999	41	7 167	42	6 650
200 000-249 999	259	57 813	87	20 205
250 000-299 999	140	37 115	204	54 088
300 000-349 999	12	3 891	61	19 471
350 000-399 999	1	367	38	14 102
400 000 et plus	2	952	70	30 355
Total	3 443	231 908	1 202	194 637

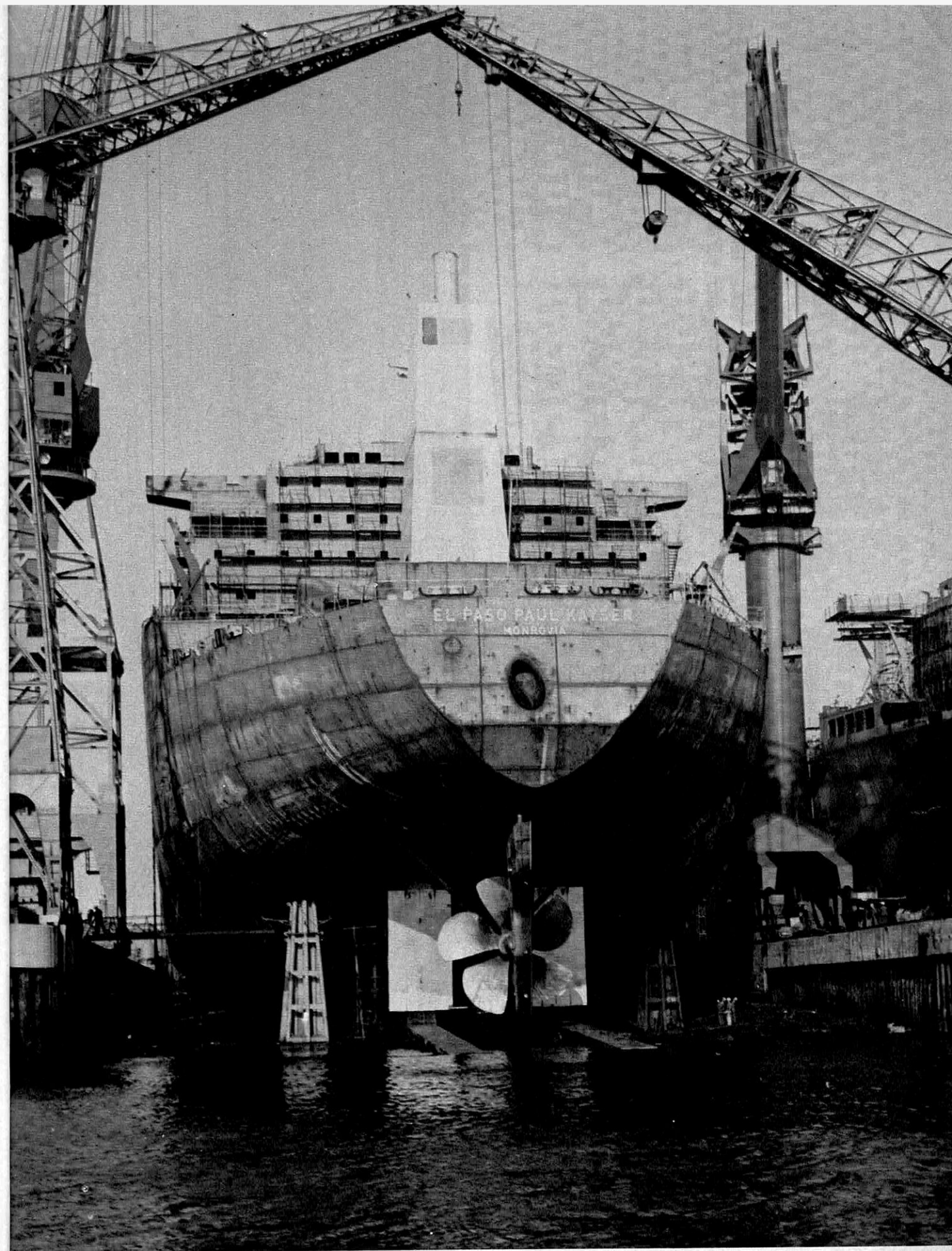
La flotte pétrolière est naturellement répartie entre de nombreux pavillons, dont les principaux à fin 1973 étaient :

Libéria	59 157 000	tpl	soit	27,45 %	du total
Grde-Bretagne	27 774 000	tpl	soit	12,89 %	du total
Japon	26 096 000	tpl	soit	12,11 %	du total
Norvège	21 220 000	tpl	soit	9,85 %	du total
Grèce	12 640 000	tpl	soit	5,86 %	du total
France	9 595 000	tpl	soit	4,45 %	du total
Etats-Unis	9 492 000	tpl	soit	4,40 %	du total
Panama	7 637 000	tpl	soit	3,54 %	du total

dire qu'une ère nouvelle s'est alors ouverte.

Le tableau VIII porte sur le commerce maritime mondial de gaz naturel liquéfié ou GNL. On peut y remarquer le rôle primordial de l'Algérie, qui a d'ailleurs inauguré ce type de commerce avec le premier contrat entre Arzew et Coney Island (Grande-Bretagne) en 1964, et qui totalise 35 % en volume de tous les contrats actuellement connus. Mais à l'échelle mondiale, et comparé au commerce maritime du pétrole, le commerce du gaz naturel liquéfié est encore relativement modeste. Dix ans après son début, il portait sur environ 18 milliards de m³ par an, pour une production totale commercialisée (c'est-à-dire non compris le gaz réinjecté ou brûlé à la torche) d'environ 1 270 milliards de m³ (en 1973). Même si on ajoute tous les contrats du tableau VIII, dont certains n'entreront pas en opération avant 1980, on ne totalise encore qu'environ 165 milliards de m³, pour une production totale qui devrait se situer entre 1 500 et 2 000 milliards de m³.

Le gaz naturel est un combustible exceptionnel, d'une remarquable propreté, et sa demande



Si la flotte mondiale de méthaniers n'est pas comparable à celle des pétroliers, la tendance actuelle est tout de même aux très fortes capacités. En témoigne cette unité de 125 000 m³ destinée aux Etats-Unis.

LE PÉTROLE DE LA MER DU NORD

Selon les estimations officielles — qui sont révisées à la hausse presque tous les trimestres, sinon tous les mois ! — la production pétrolière du secteur britannique de la Mer du Nord pourrait atteindre en 1980 de 100 à 140 millions de tonnes par an, et s'y maintenir ou même continuer à croître après 1980.

Les découvertes déjà effectuées dépassent 1,5 milliard de tonnes en réserves, et pourraient être d'au moins le double.

	Prouvées	Proba- bles	Possi- bles	Total
(en millions de tonnes)				
10 gisements déclarés rentables (1)	895	165	100	1 160
Autres découvertes importantes non encore évaluées	—	230	160	390
Total des découvertes existantes	895	395	260	1 550
Découvertes futures escomptées dans les permis existants	—	700	700	1 400
Total des découvertes dans les permis existants	895	1 095	960	2 950

Les réserves prouvées, probables et possibles de gaz naturel ont été évaluées à environ 800 milliards de mètres cubes (dont 80 % effectivement prouvées) dans le bassin méridional, et à 380 milliards de mètres cubes (dont 40 % prouvées) dans le bassin septentrional. Ces réserves devraient permettre une production de l'ordre de 50 milliards de mètres cubes d'ici 1980.

Dans la zone norvégienne, les chiffres officiels des réserves du complexe d'Ekofisk n'ont pas été communiqués (2), mais devraient permettre d'ici 1980-1982 une production (volontairement plafonnée par les Norvégiens pour des raisons politiques, économiques et sociales intérieures) de l'ordre de 50 millions de tonnes par an, et d'environ 19 milliards de mètres cubes de gaz.

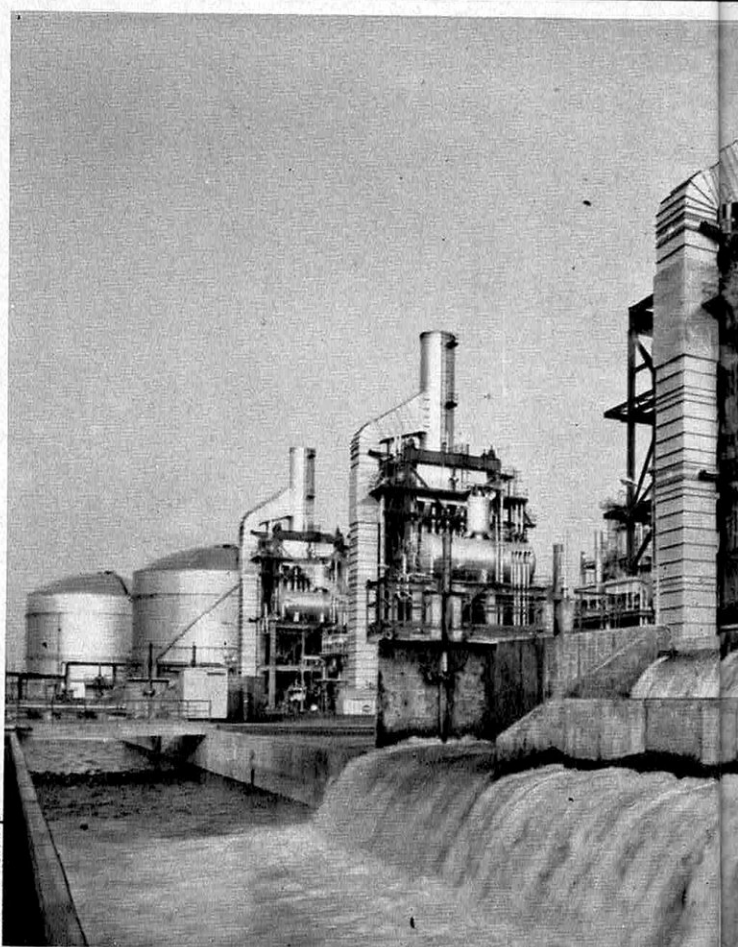
Mi-1974, un nouveau gisement géant dénommé Statfjord a été découvert par le consortium Statoil (Société d'Etat norvégienne) et Mobil Oil. Les réserves y ont été initialement estimées à 300 millions de tonnes de pétrole et à 1,35 milliard de mètres cubes de gaz associé. Statfjord est situé immédiatement au Nord-ouest de l'énorme gisement britannique de Brent. Au contraire d'Ekofisk, le pétrole de Statfjord sera peut être transportable en Norvège.

(1) Forties, Auk, Brent, Argyll, Piper, Beryl, Dunlin, Thistle, Montrose et Ninian (auxquels on pourrait ajouter Maureen, Claymore, etc.).

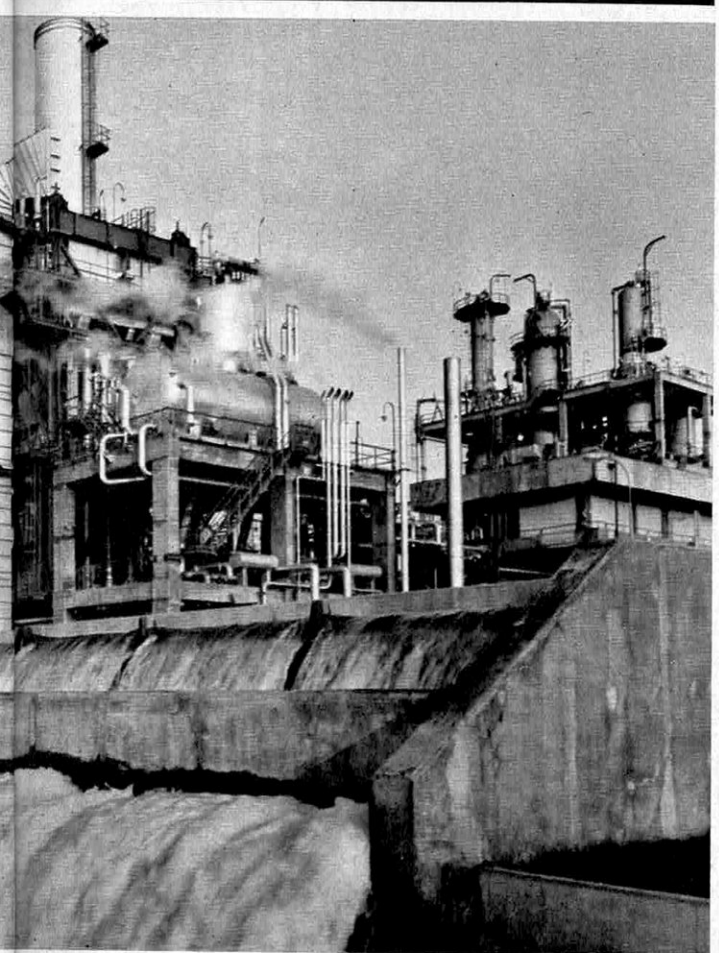
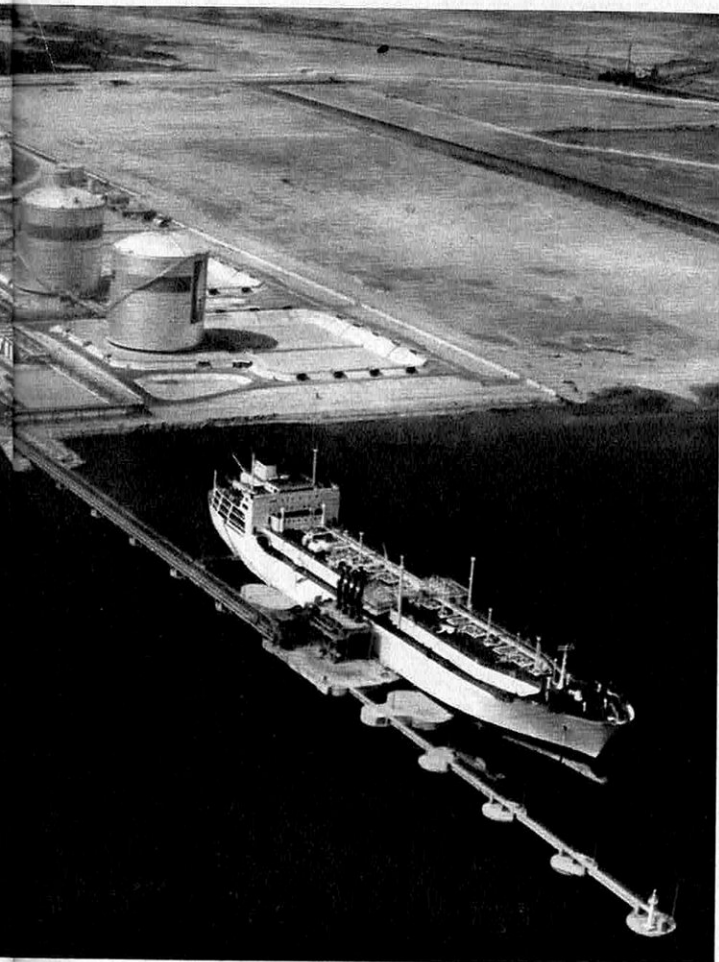
(2) La structure d'Ekofisk s'étend sur 120 km², alors que Forties s'étend sur 90 km². L'épaisseur de la colonne d'huile à Ekofisk est de 201 m, contre 118 m pour Forties. Rappelons que Forties aurait des réserves d'environ 630 millions de tonnes de brut, dont 260 millions seraient récupérables.



Gaz de France.



Doc. Technip.



Le commerce mondial du gaz naturel liquéfié ne se caractérise pas par sa souplesse. Il met en jeu des chaînes rigides comprenant gisement, pipe-line, usine de liquéfaction, transport par méthanier, stockage cryogénique au port de réception, regazéification, distribution. On peut voir ici deux maillons d'une telle chaîne : le port méthanier de Fos (en haut) et l'usine de liquéfaction de Skikda, en Algérie (en bas).

est fortement croissante. Mais son transport maritime est particulièrement coûteux et demande une chaîne, rigide et dispendieuse, reliant le gisement à l'utilisateur : gazoduc entre gisement et site côtier, usine de liquéfaction, stockage cryogénique, méthanier, nouveau stockage cryogénique à la réception, usine de regazéification, et connection au réseau de distribution et de stockage.

La flotte mondiale de méthaniers est encore peu importante comparée à la flotte de pétroliers. Début 1974, il y avait 21 transporteurs de GNL en service, représentant 867 000 m³ de capacité. Mais cette flotte est en croissance rapide, et à la même date, il n'y avait pas moins de 45 navires en commande, d'une capacité totale de 4 634 000 m³. On peut remarquer une sensible augmentation des tonnages : 41 000 m³ pour la moyenne des navires en service, 103 000 m³ pour la moyenne des navires en commande.

On peut s'attendre au rôle croissant des producteurs de pétrole du Moyen-Orient (bien modeste jusqu'à présent, comme le montre le tableau VIII), pour autant que les craintes politiques ne viennent pas contrecarrer une telle tendance. Actuellement, la diversification d'approvisionnement est plus grande que pour le pétrole, et vue la marge considérable de développement dans de nombreux pays pétroliers (gaz associé à la production de pétrole, sans parler d'importants gisements de gaz sec), on peut penser que les pays consommateurs veilleront à maintenir cette diversité, facteur de sécurité.

Notre civilisation restera basée, longtemps encore, sur les hydrocarbures. Ce serait d'ailleurs une erreur économique que de vouloir s'éloigner du « dieu pétrole » trop rapidement. Ce qui ne veut pas dire qu'il faut rester passif ; et il faut certes chercher à améliorer la situation du marché international.

Il reste encore beaucoup de pétrole et de gaz naturel en terre, soit dans des réservoirs connus, soit dans des réservoirs à découvrir. Trouver et produire ces hydrocarbures, les transporter et les transformer, demandera des capitaux énormes (n'a-t-on pas parlé de 1 000 milliards de dollars d'ici 1985 ?), et des conditions financières saines.

C'est en somme un problème de gestion : l'humanité saura-t-elle gérer au mieux son patrimoine hydrocarbures, tout en préparant de façon optimale, vu le caractère essentiellement fini, limité, de ce patrimoine, la transition inévitable vers les énergies nouvelles ?

Michel GRENON

LES NOUVELLES SOURCES DE PÉTROLE



Photos B.P.

La plate-forme d'exploration Sea Quest en Mer du Nord.

En dehors de l'off-shore, il existe plusieurs moyens d'accroître les ressources en produits pétroliers. Il y a le pétrole des régions arctiques. Il y a les gisements de schistes bitumineux ou de sables asphaltiques. Il y a, enfin, les gisements classiques dont on n'a su longtemps tirer qu'une petite partie des ressources. Leur activation par des techniques modernes peut être à l'origine de «regains» pas du tout méprisables.

Devant la crise pétrolière, on a pensé, bien évidemment, aux énergies de remplacement dont la principale est, sans conteste, l'énergie nucléaire. Mais cela ne veut pas dire que tout est fini pour les hydrocarbures, bien au contraire.

La première chose à faire est d'augmenter la quantité de pétrole que l'on extrait des gisements. La deuxième est de chercher de nouveaux gisements dans les régions qui, par leurs difficultés d'accès, avaient jusqu'ici peu attiré les prospecteurs. Cette politique a eu pour conséquence de faire progresser tout le travail off-shore en suscitant une extraordinaire floraison de réalisations et de recherches technologiques.

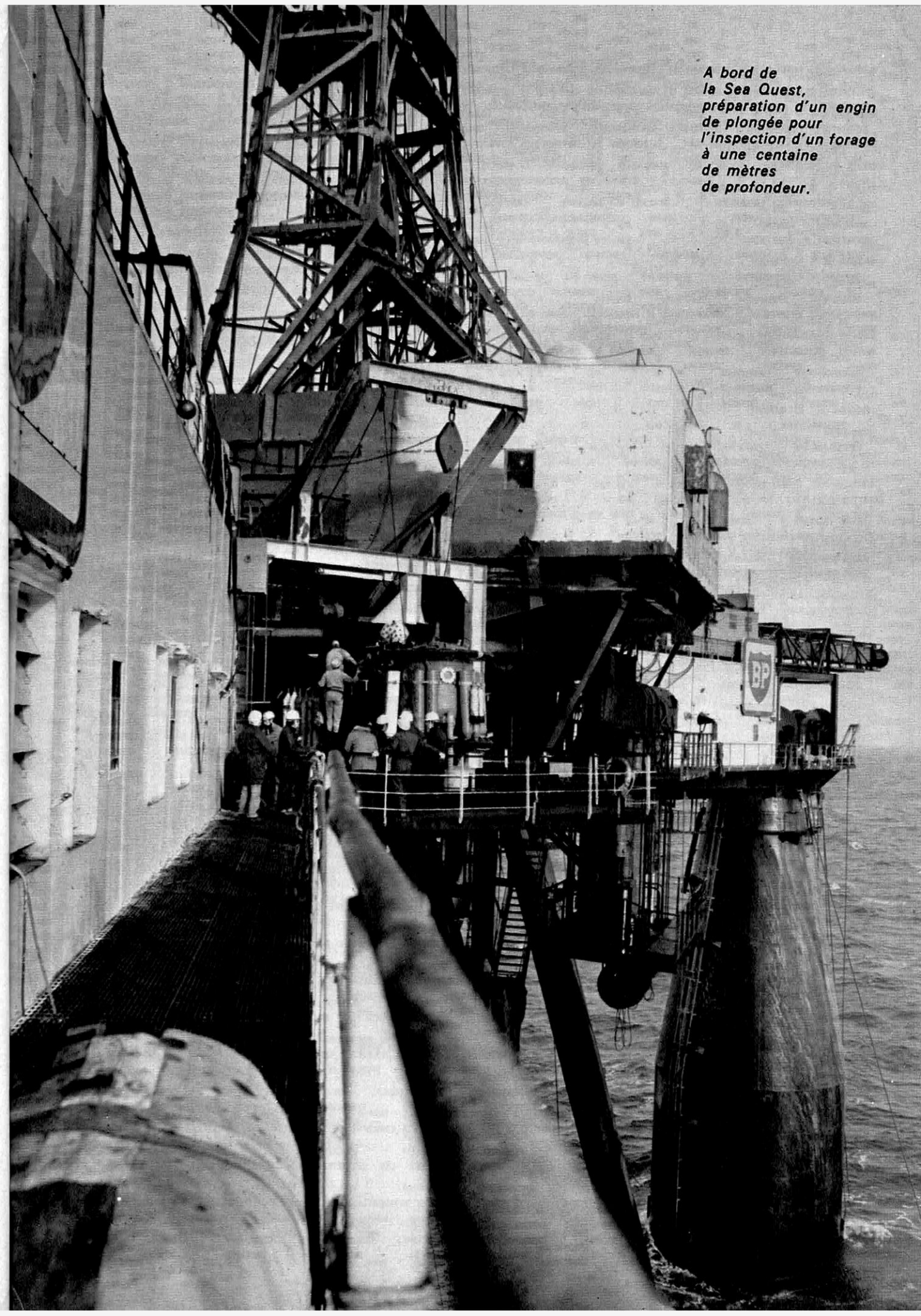
La troisième solution, enfin, est d'extraire du pétrole (ou des produits voisins) de gisements très différents des gisements classiques d'hydrocarbures, c'est-à-dire des schistes ou des sables bitumineux.

L'ACTIVATION DES GISEMENTS

Contrairement à ce qu'on croit encore trop souvent, un gisement d'hydrocarbures n'est jamais constitué par de grandes cavernes remplies de pétrole ou de gaz. Un gisement est formé par une roche-magasin (grès, calcaires, sables...), poreuse et perméable, dont une partie des pores est remplie de pétrole ou de gaz. L'ensemble des pores ne représente que 10 à 15 % du volume total du réservoir, 25 à 30 % dans les cas exceptionnels. Les pores de la partie inférieure sont occupés par de l'eau, salée en général, plus lourde que les hydrocarbures. Et, dans le cas d'un gisement de pétrole, les pores de la partie supérieure sont très souvent remplis par du gaz, plus léger que le pétrole.

Ces pores sont microscopiques (de 1 à 10

*A bord de
la Sea Quest,
préparation d'un engin
de plongée pour
l'inspection d'un forage
à une centaine
de mètres
de profondeur.*



microns en moyenne), si bien que le pétrole (l'« huile » dans le jargon franglais des pétroliers), plus ou moins visqueux, ne peut y circuler facilement. Et ce, d'autant moins que l'ensemble de la roche-magasin est rarement homogène. Sa porosité et sa perméabilité ont des variations locales et la roche présente souvent un réseau de fissures naturelles dont les plus larges peuvent constituer autant de chenaux préférentiels pour la circulation de l'huile. Celle-ci restera bloquée dans les îlots de roches isolés les uns des autres par ces fissures.

En général, l'exploitation « primaire » — qui est possible grâce à la pression propre qui règne dans le gisement — ne permet guère de récupérer que 10 à 35 % du pétrole. Une récupération de 40 % est exceptionnelle. Pour le gaz, le taux de récupération est en général de 80 à 90 %, mais il est moindre si le gaz contient beaucoup de condensats.

La pression qui règne à l'intérieur d'un gisement de pétrole tient à deux facteurs : d'une part le poids des fluides présents dans les terrains surmontant le réservoir, qui fait augmenter la pression d'environ un bar par dix mètres de profondeur ; d'autre part la quantité de gaz emprisonnée dans la partie supérieure du réservoir et qui peut être en surpression. Dans ce cas, le gaz aura tendance à remplir de proche en proche les vides laissés par l'exploitation du pétrole qu'il poussera ainsi vers le bas... et vers les puits. Le gaz aura ainsi de plus en plus de place à sa disposition et sa pression baissera, faisant décroître l'énergie propre du gisement jusqu'au moment où elle deviendra insuffisante.

La première méthode pour activer un gisement en cours d'exploitation est de faire remonter la pression interne par des injections dans la « poche » d'eau sous-jacente (c'est le plus simple et le moins cher) ou par injections de gaz au-dessus du gisement. On pratique cette technique depuis une trentaine d'années. Et on lui a apporté peu à peu divers perfectionnements.

Des recettes diverses

A Hassi-Messaoud, on injecte par jour dans le gisement, sous une pression de l'ordre de 400 bars, 5 milliards de mètres cubes de méthane et d'éthane, le « gaz fatal » provenant du dégazage du pétrole. Ce gaz se mélange et se dissout même en partie dans l'« huile » et, partout où il passe, il permet de récupérer 100 % du pétrole contenu dans le gisement. Malheureusement la quantité de gaz disponible ne permet de récupérer que 35 % des réserves totales du gisement (au lieu, tout de même, des 17 % dont on aurait dû se contenter avec une exploitation normale).

Dans certains gisements, des injections de gaz carbonique seraient assez efficaces. Mais on dispose rarement, à proximité des gisements pétroliers, des énormes quantités du gaz qui seraient nécessaires.

Les injections d'eau peuvent être améliorées si on leur ajoute des produits tensio-actifs qui

ont la propriété de réduire les forces capillaires responsables de l'immobilisation dans le réservoir de la plus grande partie du pétrole.

A l'heure actuelle, l'adjonction de ces additifs en est encore au stade expérimental. De toutes façons, l'emploi systématique des tensio-actifs sera contrarié par le temps qu'ils mettent à devenir efficaces : il faut plusieurs années avant que les additifs injectés avec l'eau aient un effet tangible sur la production de pétrole. Le procédé ne pourra donc être utilisé que dans les gisements dont l'exploitant sera absolument sûr de garder la concession exclusive pendant plusieurs années.

On peut aussi injecter des fluides chauds (de la vapeur par exemple) ou faire brûler *in situ* une partie de l'huile contenue dans le réservoir. Dans ce dernier cas, il faut évidemment injecter de l'air pour que la combustion soit possible. Si on utilise le procédé de la combustion *in situ*, une petite fraction (quelques pour cent) du pétrole brûlera, donc sera perdue. Mais la chaleur, engendrée par cet incendie volontaire que l'on entretient en permanence, sera suffisante pour chauffer tout ou partie du gisement. L'huile chauffée deviendra moins visqueuse et le taux de sa récupération en sera augmenté. Le procédé qui convient particulièrement aux pétroles très lourds, est déjà employé en Roumanie, en Californie, au Texas, au Venezuela et au Canada.

LES PROGRÈS DE L'OFF-SHORE

Les premiers gisements d'hydrocarbures exploités ont été ceux où le travail était le plus facile. Maintenant on s'attaque à des gisements situés dans des zones rendues particulièrement difficiles par les conditions naturelles. Au premier rang de ces zones difficiles, il faut mettre, bien évidemment, la Mer du Nord.

D'après les pétroliers, qui ont pourtant « roulé leur bosse » dans des endroits peu accueillants — le golfe Persique ou le Sahara, par exemple, — rien ne peut se comparer à la Mer du Nord. Le mauvais temps y est habituel, et plus on monte vers le Nord, plus les conditions sont mauvaises, surtout lorsqu'on n'a plus la protection des îles britanniques contre les vents et les grandes houles de l'Atlantique. La vague « séculaire » (celle que l'on risque de voir une fois en cent ans) est estimée à 24 mètres à Ekofisk (sur le 56^e parallèle), à 28 mètres à Forties (sur le 57^e parallèle) et à 30 mètres à Brent (sur le 61^e parallèle).

En outre les gisements de la Mer du Nord sont situés par des profondeurs d'eau rarement atteintes sur les autres gisements de pétrole off-shore du monde. Bien évidemment, la profondeur d'eau augmente aussi dans les autres zones sous-marines où l'on recherche actuellement des hydrocarbures. L'été dernier, Shell a ainsi foré au large du Gabon par des profondeurs de 645 mètres.

A l'heure actuelle, la Mer du Nord détient toutefois les records de profondeur d'eau pour les gisements en cours d'équipement : 110 à 120 mètres à Forties ; 110 à Frigg ; 120 à Beryl et 145 à Brent...

Les conditions de mer et la profondeur d'eau ont amené le développement de toute une série de nouveaux engins de forage ou d'exploitation. En tout premier lieu, il a fallu multiplier les plates-formes de forage semi-submersibles, puisque les plus grandes plates-formes « à pattes » (dites aussi auto-élévatrices) ne peuvent être posées sur des fonds dépassant une centaine de mètres. Cette tendance ressort très nettement des statistiques. En août 1974, sur les 218 engins de forage au travail dans toutes les mers du monde, on comptait 125 plates-formes auto-élévatrices, 53 plates-formes semi-submersibles et 40 navires ou barges. Dans le même temps, on prévoyait qu'en 1977-1978 le « parc » d'engins de forage compterait 396 unités réparties en 185 plates-formes auto-élévatrices, 130 plates-formes semi-submersibles et 81 navires ou barges.

Les plates-formes semi-submersibles sont évidemment moins stables que les plates-formes « à pattes ». Mais, d'une part, les flotteurs situés à la base des piles sont à une vingtaine de mètres sous la surface de la mer, ce qui a pour effet de soustraire en partie les engins aux effets de la houle. Une plate-forme du type « Pentagone », élaborée par l'Institut français du pétrole et la société Neptune, pilonnera (le pilonnement est le mouvement vertical d'un corps flottant à la surface des eaux) seulement de deux mètres, ce qui est le maximum tolérable pour forer avec une houle de 10 mètres de crête à creux et de 10 secondes de période, ou de 6 mètres crête à creux et 17 secondes de période. Et encore le pilonnement tolérable sera-t-il de huit mètres si le derrick de forage est équipé d'un dispositif spécial anti-pilonnement.

D'autre part, la plate-forme est liée au fond par 6 à 10 énormes ancres pesant chacune de 13 à 18 tonnes. La nécessité de l'ancrage limite évidemment la profondeur d'eau par laquelle une plateforme semi-submersible peut travailler. Pour la plupart des engins de ce type, la profondeur d'eau maximum est de 180 mètres. Mais on commence à construire des plates-formes semi-submersibles qu'il sera possible d'ancrer par 300 et même 450 mètres d'eau.

La propulsion autonome

Au début, les plates-formes étaient purement passives. Dépourvues de tout moyen propre de propulsion, elles devaient être remorquées d'un site de forage à l'autre. On construit maintenant des plates-formes semi-submersibles autopropulsées : ainsi la Zapata Uglund a-t-elle traversé l'Atlantique par ses propres moyens en juin 1974 pour venir travailler en Mer du Nord. Partie de Sabine Pass (Texas), elle a mis 21 jours et un peu plus de 14 h pour arriver à Aberdeen.

Même autopropulsées, les plates-formes semi-

submersibles doivent être ancrées et il leur faut, à elles aussi, l'assistance d'un navire spécial pour poser ou relever leurs ancres. A chaque fois, ces opérations de pose ou de relevage sont longues. Les engins de ce type sont donc incapables de fuir rapidement un site de forage devenu dangereux pour une raison quelconque. C'est pourquoi on ne peut les utiliser pour forer dans les mers arctiques où l'on est à la merci de la dérive des icebergs.

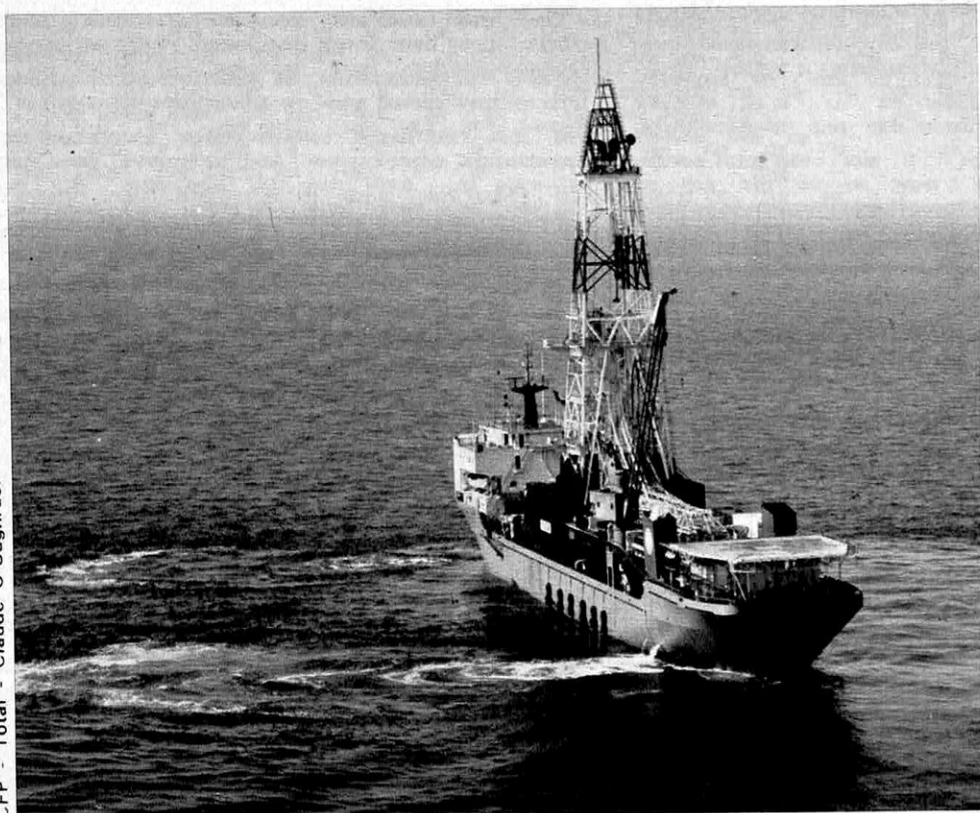
Le progrès suivant dans les engins de forage a été la réalisation de navires spécialisés, dotés du positionnement dynamique. Là, plus besoin de lourdes ancres. Le navire se maintient au-dessus du forage grâce à ses hélices transversales commandées par ordinateur, le système de référence étant constitué soit par des émetteurs d'ondes ultra-sonores posés sur le fond autour du puits, soit par un fil vertical tendu entre le bateau et la tête de puits. La souplesse de manœuvre est parfaite, le maintien d'une position précise est assuré et la profondeur d'eau peut être beaucoup plus grande (jusqu'à plusieurs milliers de mètres).

Bien qu'un navire flottant sur la mer soit beaucoup moins stable qu'une plate-forme semi-submersible, même avec un équipement anti-pilonnement et un dispositif anti-roulis, ces unités connaissent actuellement une grande vogue. Ainsi le *Pélican*, propriété d'une association Compagnie navale des pétroles-Foramer-Doris et mis en service en 1972, a-t-il quatre frères, analogues à lui, qui sont soit déjà construits, soit en construction.

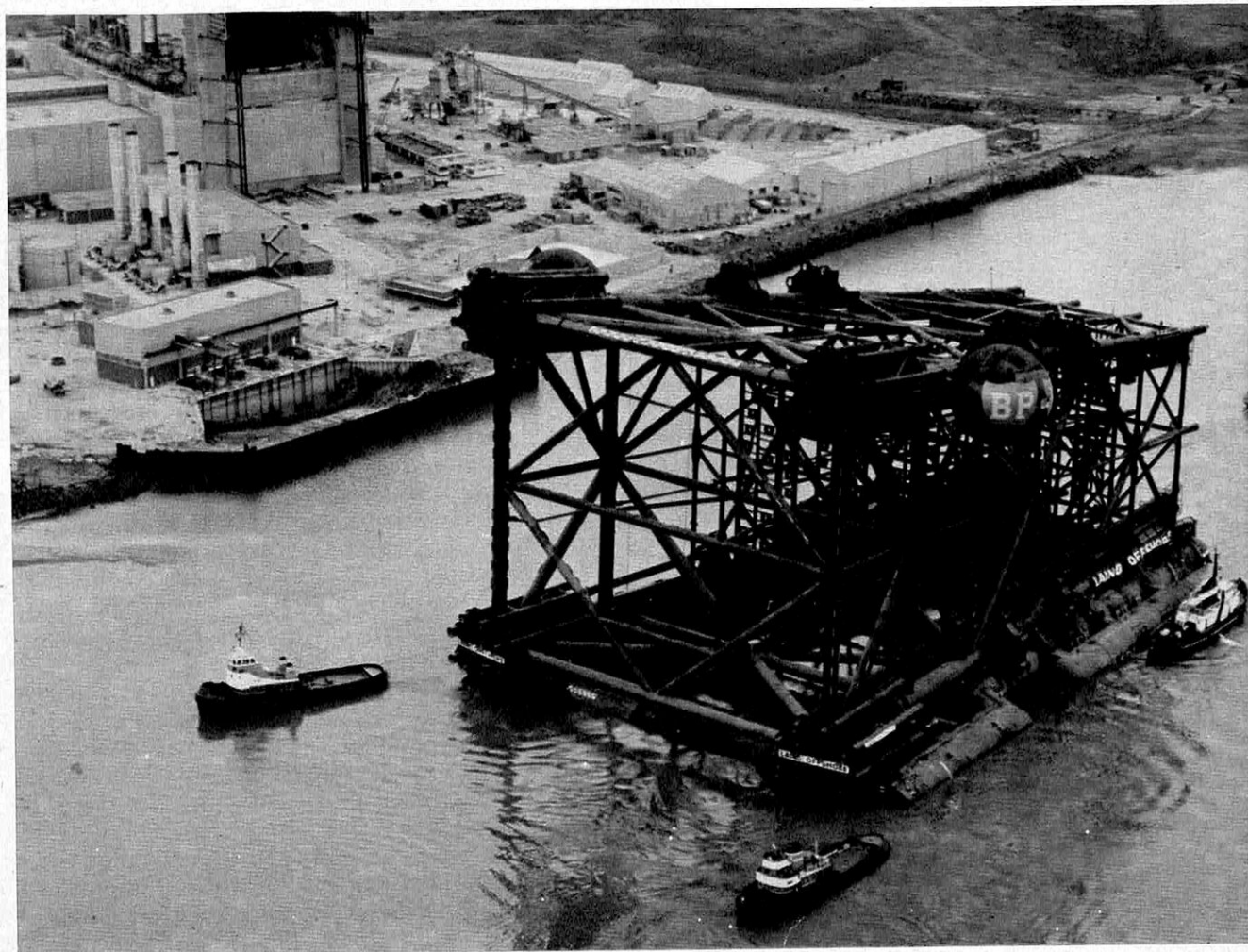
On pense maintenant à un nouveau type d'engins de forage sous-marin : la plate-forme semi-submersible à positionnement dynamique et autopropulsée. Un tel engin réunirait la stabilité des plates-formes semi-submersibles à la souplesse des navires de forage. Pour le moment, il n'existe aucune plate-forme à positionnement dynamique. Mais Shell en ferait construire une à Halifax (Canada), bien qu'aucune image de cet engin n'ait été publiée. Deux groupements français ont étudié chacun une plate-forme de ce type. L'IFP-Foramer et la Compagnie française d'entreprises métalliques (C.F.E.M.) d'une part, Forex-Neptune d'autre part, ont leurs dossiers prêts pour construire, les premiers une « Dyposemi », les seconds une « Dynacat ».

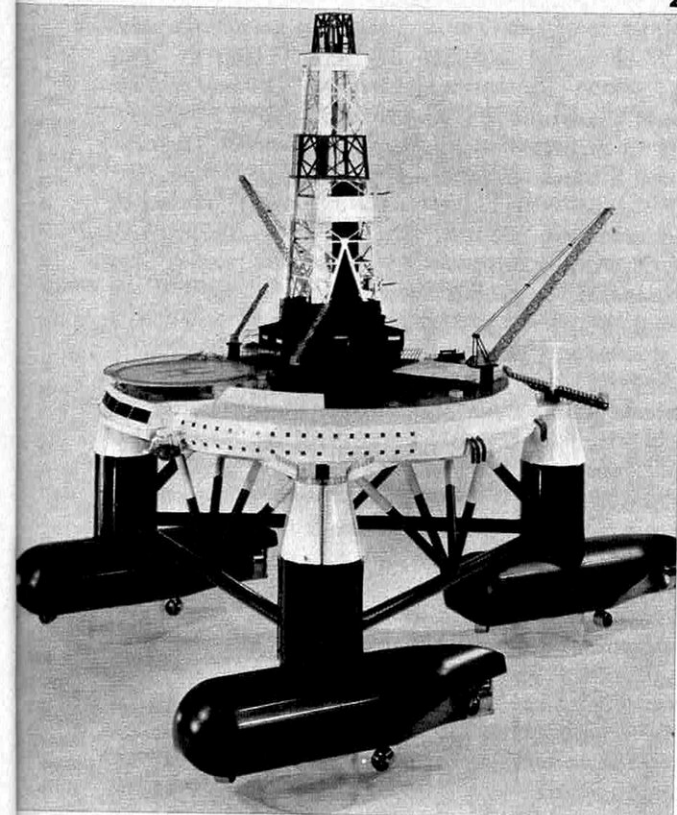
Monstres d'acier et de béton

Tous ces engins, de la plate-forme « à pattes » jusqu'à la future semi-submersible à positionnement dynamique, sont destinés aux forages et non à la production. Dans ce dernier domaine, il a fallu concevoir et construire des plates-formes fixes. La production de pétrole ou de gaz ne peut en effet s'accommoder, pour le moment, de plates-formes semi-submersibles toujours soumises aux aléas de la mer. En l'état actuel des techniques, il faut un support parfaitement stable dans toutes les conditions de mer pour les têtes



(1) Le navire de forage Pélican est équipé du positionnement dynamique. Il a effectué dans le cours de l'année 74 une campagne d'exploration dans la mer du Labrador. — (2) Un prototype de plate-forme semi-submersible à propulsion autonome, et qui serait dotée du positionnement dynamique. Ce modèle est étudié en France par un groupe comprenant l'Institut Français du Pétrole. Ce type d'engin présenterait l'avantage d'une stabilité accrue tout en conservant la facilité de manœuvre d'un navire. — (3) La plate-forme de production Graythorp I en route vers le champ de Forties en juin 74.





Doc. IFP.

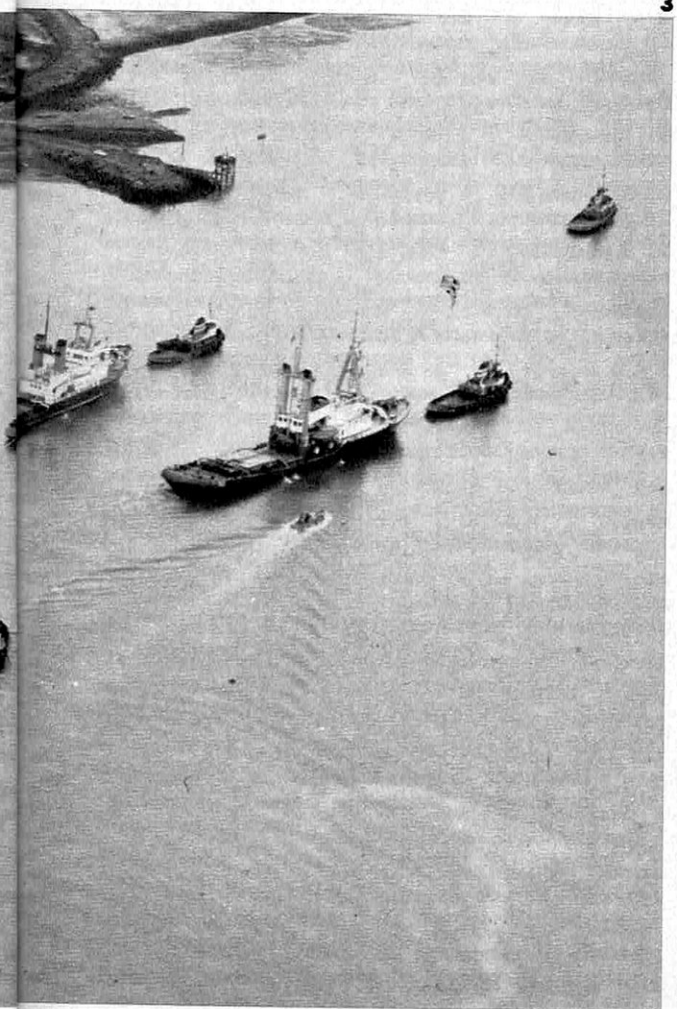


Photo B.P.

des vingt-quatre, trente-six ou quarante puits de production et pour les installations de dégazage.

Cet impératif a conduit à deux solutions.

- Ou bien on construit des plates-formes de production — des « jackets » — en acier reproduisant, en plus grand, en plus gros et en plus épais, les jackets installés sur tous les gisements off-shore. C'est ce type de plate-forme qui a été adopté par la B.P. pour équiper le champ de Forties. La profondeur de l'eau (de 106 à 125 mètres) et la hauteur de la vague séculaire (28 mètres) ont obligé à concevoir de vrais « monstres ». Chacun des quatre jackets prévus aura une hauteur de 125 à 142 mètres (non compris les trois ponts posés ultérieurement) et un poids, nu, de quelques 20 000 tonnes. Avec les ponts et tous les équipements, chaque plate-forme de production pèsera environ 57 000 tonnes. Rappelons, par comparaison, que la Tour Eiffel pèse 7 000 tonnes... Deux des jackets ont été mis en place à Forties au cours de l'été dernier, les deux autres sont en construction.

Notons aussi un nouveau modèle de plate-forme en acier : la plate-forme-torchère oscillante que la Compagnie française d'entreprises métalliques (C.F.E.M.) construit actuellement pour Brent. Calculée selon le même principe que la plate-forme oscillante expérimentale essayée avec succès par Elf-Erap dans le Golfe de Gascogne de 1968 à 1971, cette torchère sera constituée d'une embase-poids de 800 t posée sur le fond et d'une colonne de 200 m de haut. Les deux parties de la structure seront reliées par un joint à la cardan qui permettra à la colonne de répondre aux sollicitations des plus fortes houles par de légères oscillations.

- Ou bien on réalise des plates-formes réservoirs en béton précontraint. Le premier engin de ce type a été construit dans le fjord de Stavanger (Norvège) en 1971-1973. Conçu par la société française C.G. Doris, l'ouvrage est lui-aussi gigantesque : 90 m de haut, 96 m de long, 92 m de large — soit à peu près le double de la hauteur (50 m) et de la longueur (45 m) de l'Arc de Triomphe. Il a été mis en place à la fin de juin 1973 à Ekofisk où, avec ses 12 800 m² de tablier et de pont, il constitue une véritable île artificielle dont la surface utilisable s'ajoute à une capacité de stockage de 160 000 m³. Le réservoir a été rempli de pétrole au début de décembre 1974.

Les techniques de construction

Devant la réussite de la construction et de la mise en place du réservoir Doris, et l'urgence de la mise en exploitation de la Mer du Nord, douze autres plates-formes réservoirs en béton précontraint ont été commandées. De modèles différents, elles sont toutes suffisamment lourdes pour tenir posées sur le fond, par leur propre poids, même lorsqu'elles seront remplies de pétrole plus léger que l'eau de mer (le réservoir Doris pèse, vide, 210 000 t). Et elles sont toutes construites en flottaison, soit dans un fjord norvégien, soit dans un « loch » de la côte occiden-

DES PRIX VRAIMENT ASTRONOMIQUES

Construire des engins énormes pour le forage ou la production et les mettre en place constituent déjà des prouesses tout à fait remarquables. Mais les payer représente aussi un tour de force. L'équipement des gisements de la seule Mer du Nord demandera 40 milliards de dollars (200 à 180 milliards de francs, selon le taux de change) si l'on veut être capable en 1985 d'extraire 135 millions de tonnes de pétrole par an de la « mare aux harengs ». Et il faut compter, pour les années à venir, sur une augmentation des prix de 18 % par an...

Une plate-forme semi-submersible coûte entre 200 et 300 millions de francs. Le prix du réservoir Doris d'Ekofisk a atteint 115 millions de francs. Quant aux plate-formes-réservoirs Condeep, leur prix unitaire a été fixé à 225 millions de francs lors de leur commande en octobre 1973. Le coût des quatre « monstres » d'acier commandés par la B.P. pour Forties est encore plus élevé : 350 millions de francs pour chacun d'entre eux nu, 700 millions avec les équipements. Par comparaison, le prix de 30 ou 35 millions de francs, demandé pour la plate-forme torçère oscillante de Brent, semble bien modeste.

Les opérations de forage sont, elles aussi, hors de prix. Un forage profond de 2 000 à 3 000 mètres, fait sur la terre ferme dans une région « normale », revient environ à 3 millions de francs dans le sud de la Mer du Nord, le prix passe à 12 ou 15 millions de francs et à 25 ou 30 millions de francs dans le nord. Et sur dix puits forés, il y en a en moyenne sept ou huit « secs » !

Une fois que les forages d'exploration ont été faits et les plates-formes de production installées, il reste encore à poser les « pipes » sous-marins qui amèneront le pétrole ou le gaz à la terre ferme. On estime qu'un pipe de gros diamètre (80 à 90 centimètres) revient à 5 ou 7,5 millions de francs par kilomètre en Mer du Nord. Passons à la longueur des pipes : Ekofisk-Teesside (Grande-Bretagne) 328 km ; Ekofisk-Emden (Allemagne de l'Ouest) 416 km ; Forties-Cruden Bay (Ecosse) 180 km...

Les forages arctiques sont également fort coûteux. Sur la terre ferme, on estime qu'un forage fait dans le Grand Nord revient à quelque 12,5 millions de francs. Les pipes-lines en construction ou en projet pour amener pétrole et gaz des zones arctiques vers les régions d'utilisation, sont, eux aussi, hors de prix : 6 milliards de dollars (27 milliards de francs) pour la conduite Prudhoe Bay-Valdez et autant pour le projet Prudhoe Bay-Delta du Mackenzie-Saskatchewan ; 5 milliards de dollars (22,5 milliards de francs) pour le pipeline des arctiques-sud-est canadien ; 3,4 milliards de dollars (15,3 milliards de francs) pour la conduite suivant la vallée du Mackenzie.

tale de l'Ecosse, fjords et lochs étant les seules baies abritées où l'on a des profondeurs de 150 à 200 m toutes proches de la terre ferme. Notons qu'une des douze plates-formes vient d'être commencée dans le fjord suédois de Strömstad. Mais ce fjord est situé à la frontière norvégienne et il est unique en Suède.

Quel que soit leur type, les plates-formes de béton sont construites de la même façon. On commence par faire, au sec, dans une « souille » provisoirement isolée de la mer, le radier de base et les premiers mètres de murs. Dès que ces murs sont suffisamment hauts pour assurer — Archimède aidant — la flottabilité de ce début de structure, on ouvre la souille et on remorque l'embryon de plate-forme en eau profonde. Là, solidement amarrée sur le site prévu pour la construction, on édifie peu à peu les parois grâce à des coffrages glissants. Ainsi la structure s'enfoncé-t-elle au fur et à mesure de sa construction.

Lorsque l'engin est terminé, il n'y a plus qu'à le remorquer jusqu'à l'emplacement prévu en pleine mer et à le poser sur le fond. Le réservoir Doris avait un tirant d'eau de 66 m lorsqu'on l'a emmené de Stavanger à Ekofisk. Ce tirant d'eau exceptionnel pose évidemment des problèmes particuliers : il a fallu repérer un itinéraire sûr au mètre près de façon que la structure ne s'échoue pas prématurément. Mais la mise en place est facile et rapide : à Ekofisk la profondeur d'eau étant légèrement inférieure à 70 m, le réservoir n'avait qu'à descendre d'à peine 4 m pour se poser définitivement sur le fond. Ce qui a été fait pour le réservoir Doris sera recommencé pour les différentes plates-formes de béton actuellement en construction en Norvège ou en Ecosse.

La stabilité et la simplicité de mise en place des structures de béton ont d'ailleurs fait naître un projet — pas encore réalisé — de plate-forme d'exploration. La société norvégienne A/S Hoyer-Ellefsen a imaginé le modèle « Condrill » que son tirant d'eau de 50 m, son poids et ses dimensions (donc sa période propre) rendraient capable de résister à des vagues de 30 m. Fixé par 10 ancrés pesant chacune 18 t, l'engin pourrait forer par une profondeur d'eau maximum de 300 m.

LE PÉTROLE PROFOND

En dépit des progrès techniques accomplis en quelques années dans l'off-shore, il est évident qu'on approche de la limite des installations de production de surface. Jusqu'à présent, on adapte en fait au domaine marin la technologie mise au point depuis longtemps pour l'exploitation des gisements terrestres.

Or, les campagnes de carottages poursuivies depuis 1968 par le Glomar Challenger, dans tous les océans du monde, ont montré qu'il pouvait y avoir des gisements d'hydrocarbures dans les bassins sédimentaires situés sous plusieurs milliers de mètres d'eau. Les marges continentales, c'est-à-dire les rebords des continents de 200 à

4 000 m de profondeur, semblent être particulièrement prometteuses, bien qu'on en soit encore au stade de la prospection par la sismique ou par quelques forages exploratoires.

Cependant, avant même d'avoir une idée des réserves des fonds océaniques, les grands groupes pétroliers travaillent à développer la technologie qui sera nécessaire d'ici cinq ou dix ans. Les techniques actuellement utilisées pour l'exploitation des gisements off-shore seront, en effet, tout à fait insuffisantes lorsque la profondeur d'eau dépassera couramment 300 m. Il semble difficile de construire et de mettre en place des structures dont la hauteur devrait être supérieure à 350 m et, en l'état actuel des connaissances, de faire intervenir des plongeurs à des profondeurs de plus de 450 ou 500 m.

Il faut donc mettre au point des têtes de puits sous-marines parfaitement fiables sur lesquelles l'entretien de routine ou les réparations simples puissent se faire depuis la surface.

Depuis une dizaine d'années, plus de 200 têtes de puits sous-marines ont été, certes, installées. Mais aucune ne l'a été dans des profondeurs d'eau dépassant de beaucoup 100 m et certaines ont encore besoin de l'assistance de plongeurs. Si on veut, dans un avenir plus ou moins proche, être en mesure de faire fonctionner des têtes de puits sous plusieurs centaines, puis plusieurs milliers de mètres d'eau, il faut être sûr de pouvoir intervenir dessus.

On peut agir depuis la surface en faisant descendre des outils par « pompage », c'est-à-dire en les faisant passer à l'intérieur d'un tube partant de structures de surface et aboutissant sur la tête de puits. C'est la voie que semble avoir choisie Shell et que Lockheed va essayer en 1975. Seal (une association franco-anglo-américaine) a conçu une tête de puits dont les éléments ont été divisés en trois niveaux, selon la longévité qu'on peut leur attribuer. Les pièces à changer seront remplacées depuis la surface grâce à leur insertion dans un système modulaire. Celui-ci sera descendu, accroché à un train de tiges, et viendra se fixer sur un cadre spécial installé à demeure sur la tête de puits.

L'œil et le jugement de l'homme sont tout de même irremplaçables. On aura donc besoin, de temps en temps, d'envoyer des spécialistes sur place. Mais la profondeur — et aussi l'efficacité du travail — imposeront de maintenir ces hommes en pression normale : ils descendront au fond dans des capsules étanches qui viendront se clamber soit sur une coquille, étanche elle aussi, coiffant à demeure la tête de puits (système Lockheed), soit sur une cloche descendue à la demande sur la tête de puits et de laquelle l'eau sera chassée pour être remplacée par de l'air à la pression normale (système Seal).

Il semble donc que les problèmes posés par l'installation de têtes de puits à grande profondeur seront résolus à plus ou moins brève échéance. En revanche les connexions des pipes-lignes sous-marins à la tête de puits et les connexions des pipes entre eux ne sont pas encore

possibles sous plusieurs centaines de mètres d'eau. On sait faire des connecteurs automatiques pour les pipes-lignes de petit diamètre (10 cm au maximum) mais pas pour les gros. En outre, plus un tuyau est gros, moins il est souple, et la pose de gros « pipes » d'acier à grande profondeur soulève des problèmes qui sont loin d'être résolus. La solution viendra-t-elle des tuyaux flexibles à la mise au point desquels l'Institut français du pétrole travaille depuis plusieurs années ?

LE PÉTROLE DU GRAND-NORD

En 1968, un énorme gisement d'hydrocarbures était découvert par Atlantic Richfield et Exxon à Prudhoe Bay, sous la plaine côtière du nord de l'Alaska, en bordure de la mer de Beaufort.

Cette découverte a marqué le début d'une vraie ruée vers l'or noir du Grand-Nord. Les prospecteurs ont accéléré leurs recherches, aussi bien en Alaska que dans la basse vallée du fleuve Mackenzie, l'archipel arctique canadien⁽¹⁾ ou le Spitsberg norvégien. Très vite ils se sont également intéressés à l'off-shore arctique, faisant des forages d'exploration dans la mer du Labrador et dans la baie d'Hudson. Quant aux pays riverains des mers arctiques, ils discutent déjà du partage des fonds marins (notamment de ceux de la mer de Barents).

Les terres et les mers arctiques semblent bien contenir des réserves importantes d'hydrocarbures. Mais le climat complique singulièrement le travail des pétroliers. Toutefois les problèmes sont très différents selon que les gisements sont terrestres ou sous-marins.

Ménager le « permafrost »

Les techniques actuelles permettent d'exploiter les hydrocarbures sur la terre ferme, si on veut bien y mettre le prix. Tout est en effet terriblement coûteux dans les régions arctiques. Il faut tout apporter, depuis le tube de dentifrice jusqu'aux trépans de forage. Presque tous les transports de personnel et de matériel doivent se faire par avion ou par hélicoptère. Ensuite, il faut suivre impérativement le rythme des saisons : dans la nuit hivernale, le sol gelé, dur comme le roc, peut supporter les véhicules les plus lourds et les atterrissages des avions gros-porteurs. Le jour perpétuel de l'été transforme, au contraire, toutes ces régions en un fantastique borborygme où les camions s'enlisent et les constructions basculent.

Un élément conditionne tout, en effet, sur les terres arctiques : l'existence du permafrost (ou sol perpétuellement gelé) qui constitue une carapace totalement imperméable.

(1) Le premier puits a été foré dès 1961-62 sur l'île Melville. Il était surtout destiné à prouver que le forage était possible sur les terres arctiques.

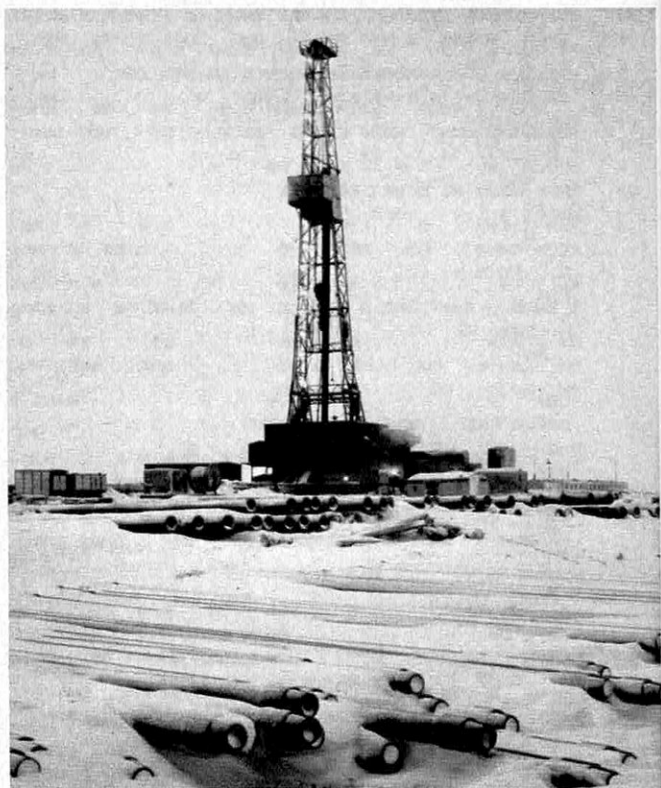
La latitude ou l'altitude imposent, certes, des variations locales au permafrost :

- l'épaisseur de la couche gelée varie de quelques mètres à quelques centaines de mètres ;
- l'épaisseur de la couche superficielle qui dégèle en été varie de quelque centimètres à quelques mètres ;
- la teneur en eau du permafrost est toujours importante, mais elle varie selon la composition du sol : depuis les argiles fines jusqu'aux alluvions glaciaires grossières et hétérogènes ;
- plus on monte en latitude et en altitude, plus la carapace de permafrost est continue. Au contraire lorsqu'on descend vers des latitudes ou des altitudes plus clémentes, le permafrost ne forme plus que des taches de plus en plus discontinues ;
- le dégel de l'été marque le réveil du tapis végétal. Ce tapis, de moins en moins épais au fur et à mesure que l'on monte en latitude et en altitude, est très vulnérable. Or, il est l'unique ressource alimentaire de nombreux animaux, notamment des caribous et des bœufs musqués.

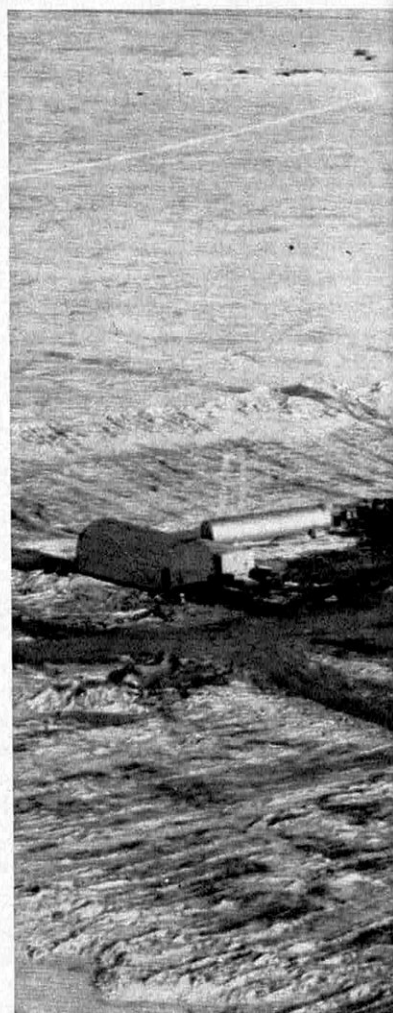
Tous ces caractères propres au permafrost imposent leurs conditions. Il faut installer les habitations, les ateliers, les têtes de puits et les pipe-lines sur des plates-formes surélevées de telle façon que la chaleur qui s'en dégage ne fasse pas fondre les couches superficielles du permafrost. Il faut aussi isoler les pistes de circulation par d'épais lits de graviers... lorsqu'il y a du gravier disponible.

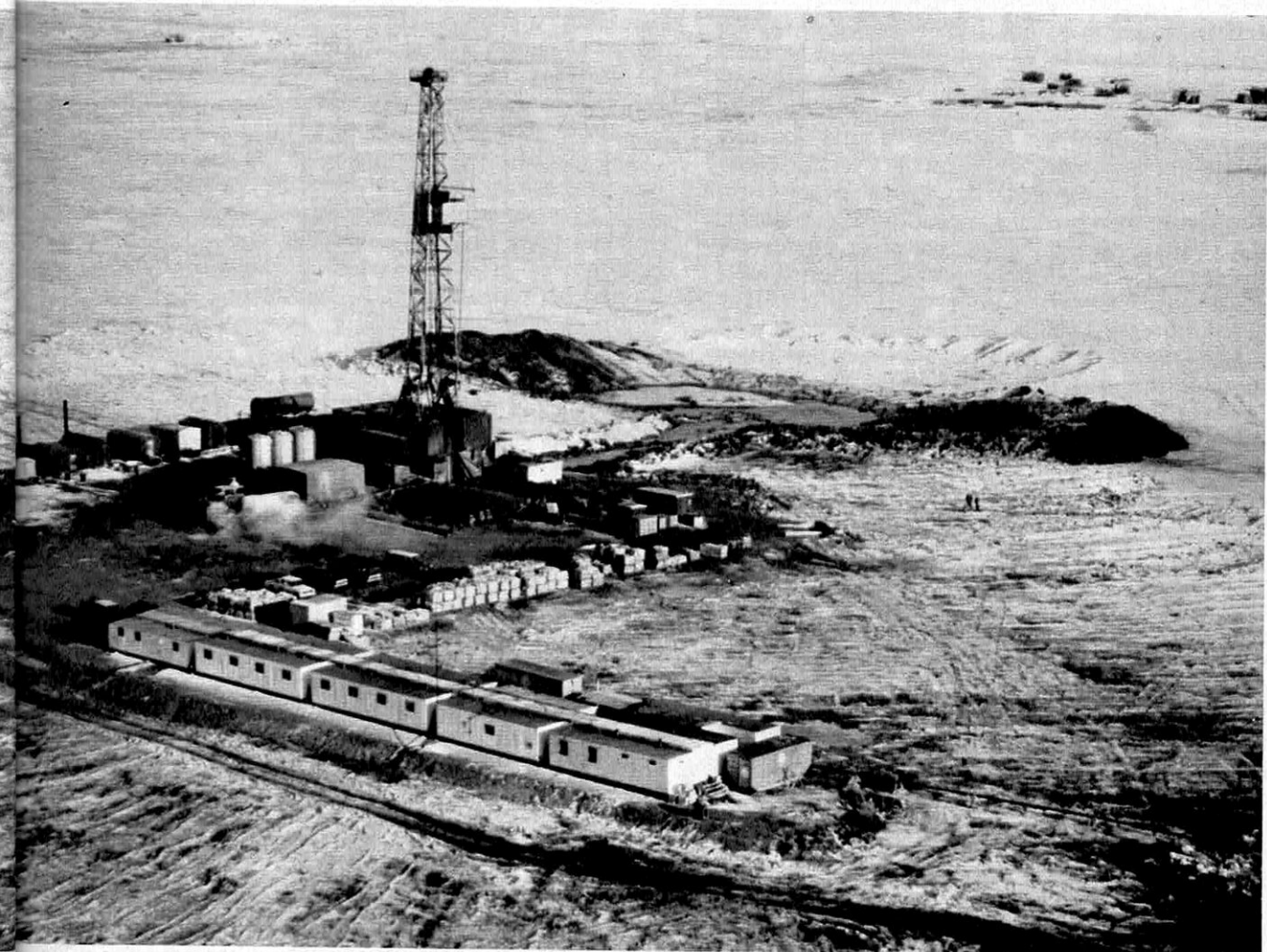
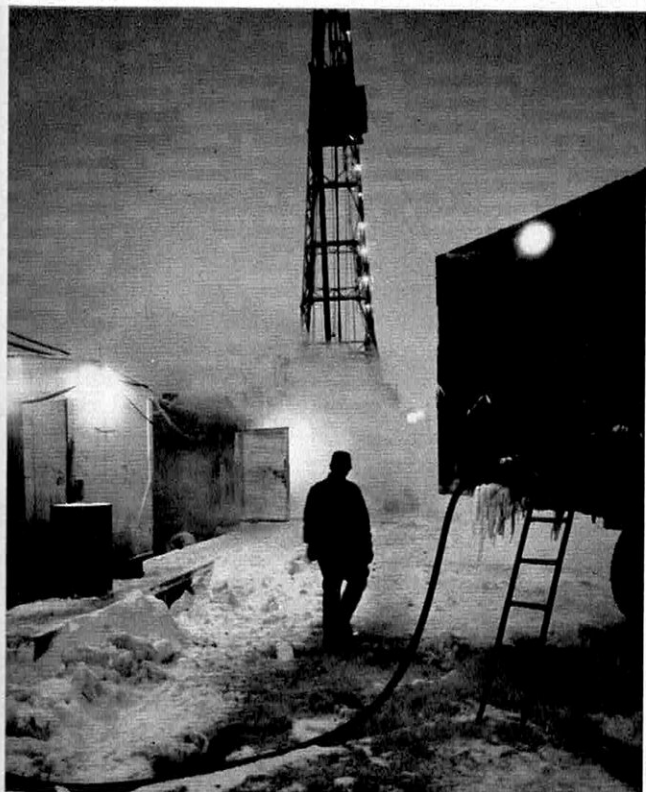
L'isolation impérative a provoqué toutes sortes de difficultés aux constructeurs du pipe-line qui doit amener le pétrole de Prudhoe Bay à Valdez, un port de la côte sud de l'Alaska. Les frictions du pétrole coulant dans la conduite feront monter la température de celui-ci à quelque $+ 145^{\circ}\text{C}$. Le « pipe » devra donc être surélevé sur une bonne partie de ses 1 300 kilomètres. Mais alors, il gênera les migrations saisonnières des troupeaux de caribous... Le pipe-line franchira aussi soixante-dix cours d'eau d'importances diverses : ne risque-t-il pas de détruire les frayères de poissons (celles de saumons en particulier) ? Quant aux engins nécessaires à la pose du pipe-line, ils menacent de détruire pour longtemps toute végétation tout au long du tracé de la conduite. Enfin, celle-ci traversera plusieurs régions sismiques. Son terminus, à Valdez, est, en particulier situé dans une zone connue pour la violence des tremblements de terre et l'importance des tsunamis (ces oscillations redoutables du niveau de la mer engendrées par des séismes sous-marins et appelées à tort en français « raz-de-marée »).

Devant toutes les menaces que le transport du pétrole faisait planer sur l'environnement arctique, des associations de défense ont engagé procès sur procès devant toutes les juridictions possibles. Ces procédures ont retardé le début des travaux de plus de quatre ans et imposé des conditions draconiennes de travail et d'installa-



Les conditions de travail sont particulièrement dures pour les pétroliers dans les zones arctiques. C'est le cas de Prudhoe Bay, sur la côte nord de l'Alaska, dont l'exploitation n'a en fait pas commencé encore, alors que sept ans se sont écoulés depuis la découverte du gisement. Le problème majeur est celui de l'évacuation du gaz et du pétrole extraits. Le principe du pipeline Transalaska a maintenant triomphé des réserves des défenseurs de l'environnement, mais la construction a été beaucoup retardée.





Photos B.P.

tion. Bref tout cela a fait monter le coût du pipeline Transalaska. Le prix en est passé de 1 milliard de dollars (4,5 milliards de francs) (1) en 1968 à 3 milliards (13,5 milliards de francs) en 1973 et à 6 milliards (27 milliards de francs) ou plus en 1974...

Il est, certes, indispensable de protéger au maximum une nature encore presque vierge. Mais il n'est peut-être pas inutile de rappeler que la construction du pipe-line Transalaska perturbera l'environnement sur 50 kilomètres carrés (en comptant un couloir de passage de 18 mètres de chaque côté du tuyau qui, lui-même, aura un diamètre de 112 centimètres) alors que la superficie de l'Alaska est de 1 518 000 kilomètres carrés.

La glace de mer et les icebergs

L'off-shore arctique est autrement difficile à conquérir que les terres du Grand-Nord. Les ennemis sont les glaces dérivantes : glaces de mer de la banquise, glaces d'eau douce (d'origine terrestre) des icebergs.

Avec l'hiver, dont la durée effective s'allonge lorsque croît la latitude, la mer gèle. L'été amène, certes, le dégel mais, bien souvent, celui-ci n'est que partiel. L'épaisseur de la glace de mer augmente donc avec l'âge de celle-ci et avec les fracturations et les pressions subies. Le dégel ou les tempêtes disloquent en effet la glace de mer, mais les dérivées et les pressions imposées par les vents et les courants poussent les morceaux de banquise au point de les faire monter les uns sur les autres. Ainsi se forment « les rides de pressions » par regel de fragments superposés. L'épaisseur est donc très variable : 1 à 2 mètres pour la glace de mer d'un an, 50 à 60 mètres pour les rides de pression les plus importantes. Cela est fort important pour la navigation dans les mers arctiques. Un brise-glace casse, sans trop de difficulté, une glace d'un mètre ; il est complètement bloqué par les rides de pression.

En outre, toute cette glace de mer est entraînée par une dérive perpétuelle. La distance journalière parcourue est de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres selon les endroits. On ne voit donc pas très bien comment, en l'état actuel des techniques, des installations fixes d'exploration ou de production pétrolière pourraient résister aux pressions exercées par la glace dérivante. On étudie cependant des plates-formes spéciales.

La solution ingénieuse des îles artificielles a permis de résoudre les problèmes créés par la dérive de la banquise, mais seulement dans les zones où la profondeur de l'eau n'excède pas 3 ou 4 m. Pendant l'été, on entasse des centaines de milliers de mètres-cube de sables et de graviers (dragés à proximité) de façon à faire des îles artificielles émergeant de quelques mètres. L'hiver suivant, le gel cimente cet amas

hétérogène en un bloc qui ne dégèlera plus. Le permafrost, bénéfique dans ce cas, assurera à l'île une permanence et une solidité telles que l'on pourra y prévoir des installations permanentes. Depuis 1972, trois nouvelles îles ont ainsi surgi des eaux de la mer de Beaufort, juste devant le delta du fleuve Mackenzie.

Contrairement à la glace de mer, les icebergs, « fabriqués » par les glaciers terrestres s'écoulant dans la mer, ne constituent que des dangers ponctuels. Mais leur masse les rend redoutables. Que peut-on faire pour s'opposer à la marche d'un mastodonte de plusieurs dizaines ou centaines de milliers de tonnes ? (il y a même des icebergs tabulaires — les îles de glace — de plusieurs millions ou dizaines de millions de tonnes). On a bien réussi à remorquer des icebergs déjà respectables, mais, dans la plupart des cas, la seule voie actuelle du salut est la fuite. Le danger dû aux icebergs impose donc de n'utiliser, pour les forages d'exploration, que des navires auxquels leur mobilité assure la sécurité.

Tout le monde sait que seul émerge un neuvième ou un dixième de la masse d'un iceberg. Le tirant d'eau de ces montagnes de glace flottante peut donc dépasser 200 m. Si l'iceberg arrive sur des fonds marins peu importants, sa « quille » labourera profondément les sols sous-marins (une haute ride de pression de glace de mer peut, d'ailleurs, en faire autant). Impossible donc de penser à l'installation de têtes de puits ou de pipes-lines sur le fond des mers arctiques sans avoir trouvé préalablement les moyens d'en assurer la sécurité.

Les insuffisances actuelles de la technologie ne découragent pourtant pas les « pétroliers ». Déjà de nombreux permis de recherche ont été obtenus pour diverses zones des mers arctiques. Et tous les grands groupes travaillent à développer les techniques qui permettront l'exploitation de l'off-shore arctique. Les pétroliers sont des gens confiants dans le progrès : les spécialistes de la Compagnie française des pétroles et de la Société nationale des pétroles d'Aquitaine estiment que, dans une dizaine d'années, on devrait être en mesure d'exploiter les hydrocarbures des mers arctiques... et pourquoi pas antarctiques.

LES SABLES ET LES SCHISTES BITUMINEUX

Parmi les matières premières pouvant remplacer les hydrocarbures liquides comme sources d'énergie, les sables et les schistes bitumineux occupent une place de choix. L'importance des réserves connues permet, en effet, d'espérer des quantités énormes d'hydrocarbures de synthèse pouvant servir soit de combustible, soit de produits de base pour la pétrochimie. Mais les sables et les schistes sont des matières premières très différentes l'une de l'autre et c'est à tort qu'on les associe souvent dans une même classification.

Seuls, les sables bitumineux (ou asphaltiques)

(1) La conversion en francs a été faite approximativement au cours du change de décembre 1974, c'est-à-dire 4,5 francs pour un dollar.

contiennent réellement du bitume, c'est-à-dire des hydrocarbures non fluides et très lourds (leur densité est comprise entre 0,95 et 1,05 alors que la densité du pétrole brut va de 0,75 à 0,95) dus à l'altération par l'eau, par l'oxygène et par des bactéries d'hydrocarbures normaux.

Les schistes bitumineux, au contraire, ne contiennent pas de bitume, mais une substance organique — le kérogène — insoluble dans les solvants classiques des hydrocarbures. Elle est si intimement mélangée à la roche sédimentaire qui lui sert de support qu'il faut avoir recours à un fort chauffage (ou pyrogénéation) en milieu non oxydant, pour former à partir d'elle l'« huile de schiste » et séparer celle-ci de la substance minérale.

La composition chimique de l'huile de schiste est différente de celle du pétrole brut : il y a plus d'azote, plus de soufre et un fort pourcentage d'oléfines (hydrocarbures de la famille de l'éthylène). On pourrait presque dire que les schistes bitumineux sont des hydrocarbures qui ont avorté : la transformation de la matière organique en hydrocarbures n'a pu se faire parce que les couches de roches-mères n'ont pas été enfouies assez profondément pour être suffisamment chauffées (une longue chaleur de 85 °C à 135 °C est une condition indispensable à la formation du pétrole ou du gaz naturel).

Une très grande viscosité

Les hydrocarbures contenus dans les sables bitumineux ont une viscosité telle que leur exploitation par pompage est presque toujours impossible. La viscosité naturelle de ces pétroles très lourds est d'ailleurs encore augmentée par la faible profondeur des couches qui ne bénéficient donc pas de la chaleur due au gradient géothermique (3 °C par 100 m en moyenne). Une seule exception connue : le pourtour du gisement vénézuélien des sables de l'Orénoque. Là, en effet, les couches de sables bitumineux se trouvent à 2 000 m de profondeur et elles sont suffisamment chauffées pour que leur bitume soit pompable.

Puisqu'on ne peut pas pomper les hydrocarbures, il faut recourir à d'autres moyens d'exploitation. Si les sables affleurent ou si leur couverture de mort-terrain n'excède pas 20 ou 30 m, on peut les exploiter à ciel ouvert ; c'est d'ailleurs ce que les Indiens faisaient il y a plusieurs siècles avec les sables d'Athabasca (Canada) qu'ils utilisaient probablement pour calfater leurs canots. Mais si les couches bitumineuses sont relativement profondes, il faudra envisager l'exploitation *in situ*.

Divers procédés ont été imaginés pour un tel mode d'exploitation (injection par un puits de fluides chauds, solvants ou émulsifiants, et récupération par un second puits des bitumes ; combustion *in situ* d'une partie du bitume de façon à chauffer le gisement). Mais aucun de ces procédés n'a dépassé le stade expérimental.

L'exploitation à ciel ouvert est pratiquée pour

les sables d'Athabasca qui sont le seul gisement actuellement exploité. Mais elle se heurte au problème des énormes quantités de « minerai » qu'il faut traiter pour produire des volumes intéressants de bitume. Etant donné que le sable en contient environ 10 %, il faut extraire et traiter 100 000 t par jour pour une production quotidienne de 7 200 m³ d'hydrocarbures.

Le traitement comporte plusieurs étapes : on sépare d'abord le bitume grâce à un solvant (soude et eau chaude) ; le bitume est ensuite mis dans un four pour être chauffé à environ 600 °C, ce qui permet d'obtenir du pétrole synthétique brut et du coke.

En dépit des difficultés d'exploitation, les sables bitumineux deviendront probablement dans l'avenir une source importante. Les gisements connus sont en effet énormes : Les sables d'Athabasca contiennent 150 milliards de tonnes de bitume dont on peut espérer récupérer 5 à 10 milliards de tonnes par exploitation minière. Mais ce chiffre pourrait passer à quelque 50 milliards de tonnes si on utilisait l'exploitation *in situ* (rappelons, à titre de comparaison, que les réserves mondiales prouvées et récupérables de pétrole sont estimées actuellement à une centaine de milliards de tonnes).

Le gisement vénézuélien de l'Orénoque est probablement aussi énorme que celui d'Athabasca : il contiendrait 100 à 150 milliards de tonnes de bitume. Il semblerait que l'archipel arctique canadien soit également fort riche en sables bitumineux, mais, là, les réserves n'ont pas encore été chiffrées.

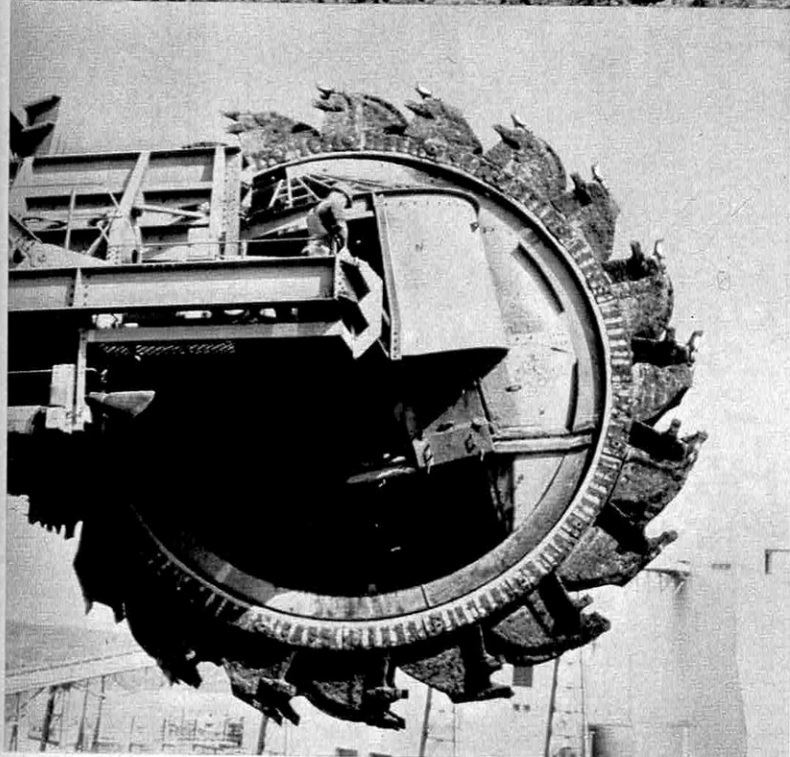
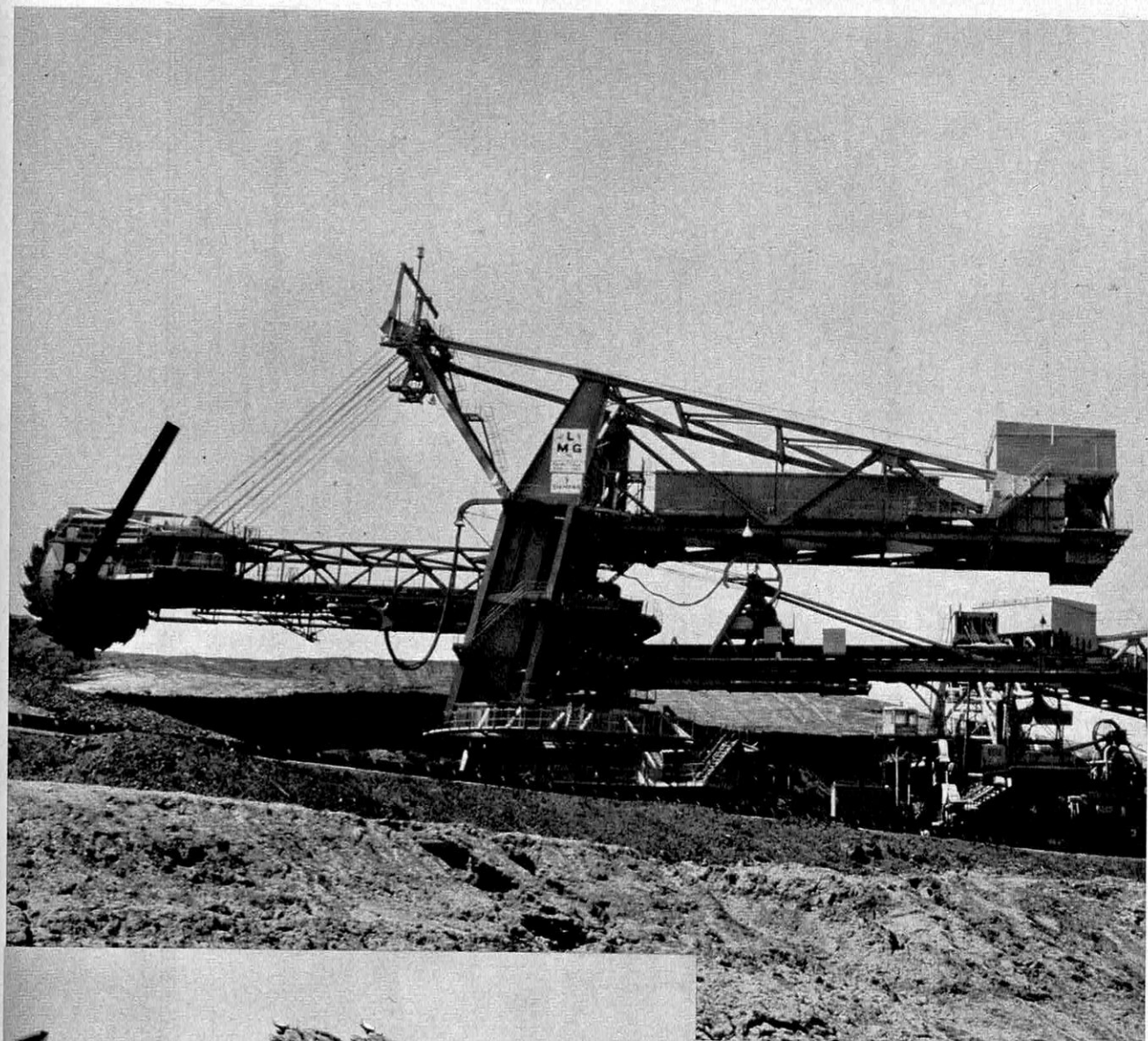
On trouve également des sables bitumineux à Madagascar et en Utah (Etats-Unis), mais ces gisements sont beaucoup moins importants : les réserves y ont été estimées respectivement à 2,5 et à 3,5 milliards de tonnes.

Notons également l'existence en France de petits gisements, non pas de sables bitumineux, mais de calcaires et de grès bitumineux. Le calcaire de Pont-du-Château (Puy-de-Dôme) a ainsi longtemps servi à faire les carreaux revêtant les trottoirs des rues de Paris et les quais de nombreuses gares françaises.

Des roches courantes

Le problème des schistes bitumineux est très différent, puisque le kérogène est insoluble dans les solvants classiques des hydrocarbures. Toute la question est de savoir si la quantité d'énergie nécessaire à la pyrogénéation des schistes est plus petite ou plus grande que l'énergie qui sera tirée de l'huile récupérée. Les schistes bitumineux (qu'il serait plus exact d'appeler « pyroschistes ») sont des formations géologiques que l'on trouve un peu partout dans le monde, mais leur « exploitabilité » dépend de la teneur en matières organiques et donc de la quantité d'huile récupérable. On pense généralement que le seuil économique est situé aux alentours de 40 l d'huile de schiste par tonne de roche : cela suppose qu'on n'exploite que les schistes contenant





Au Canada, une usine pilote d'extraction de « l'huile » à partir des sables asphaltiques. Elle est installée sur le gisement lui-même, où travaille une gigantesque machine excavatrice. L'actuelle politique pétrolière du gouvernement canadien ne paraît pas favoriser de telles expériences.



Doc. Sun Oil Co - Philadelphie.

au moins 8 ou 10 % de leur poids de matière organique.

Là encore, il faut extraire des quantités énormes de « minerai » si on pratique l'exploitation à ciel ouvert ou par galeries. Il faut donc prévoir des investissements importants pour construire les machines extractrices de grande capacité et les fours à pyrogénéation capables de produire chacun 50 000 t d'huile par an.

Il faut aussi songer aux déchets : les schistes broyés puis pyrolysés occupent en effet un volume plus grand de 30 à 50 % que la matière première initiale. Impossible donc d'utiliser la totalité des déchets à combler les mines à ciel ouvert ou les galeries souterraines.

L'exploitation des schistes se heurte aussi, dans certaines régions semi-arides (tel l'ouest des Etats-Unis) au problème de l'eau. Il faut en effet beaucoup d'eau pour stabiliser les déchets de schistes pulvérulents, puis pour y faire repousser une couverture végétale. En août 1973, une étude du Département de l'Intérieur américain estimait les besoins quotidiens en eau à 130 ou 200 millions de mètres cubes pour une production annuelle de 50 millions de tonnes d'huile. Si celle-ci atteignait 15 à 25 millions de tonnes, toutes les ressources en eau du Colorado, de l'Utah et du Wyoming devaient être attribuées exclusivement à l'exploitation des schistes...

Pour les schistes situés à des profondeurs relativement importantes, on pense aussi à l'exploitation in situ. Mais il faut d'abord arriver à fracturer régulièrement les couches constituant les gisements, de façon à rendre possible la circulation des fluides chauds injectés et celle de l'huile séparée des schistes par ces fluides ou, aussi, la combustion in situ. Les schistes sont, en effet, des roches à peu près imperméables dans lesquelles aucune circulation n'est possible naturellement.

Des concessions payées à prix d'or

L'exploitation des schistes bitumineux n'est pas nouvelle : elle a commencé en 1838 en France (avec les schistes d'Autun), un peu plus tard dans divers pays d'Europe puis du monde. Mais elle a peu à peu cessé, ruinée par la concurrence du pétrole. La deuxième guerre mondiale a redonné vie, temporairement, à ces exploitations artisanales. Et il a fallu la hausse vertigineuse du prix du pétrole pour que l'on s'intéresse à nouveau aux schistes bitumineux.

Cette nouvelle tendance ressort parfaitement du sort réservé à deux mises en adjudication par le Département de l'Intérieur américain. Au début de 1969, les enchères, pour des concessions acquises pour vingt ans, ne totalisèrent que 500 000 dollars (2 500 000 francs). En janvier 1974, six concessions d'une vingtaine de kilomètres carrés chacune furent mises en adjudication. Quatre d'entre elles ont trouvé preneur, le prix record de 210 millions de dollars (1 050 millions de francs) ayant été payé pour une seule

concession par Gulf Oil et Standard Oil of Indiana !

Les réserves américaines de schistes bitumineux sont, en effet, fantastiques. Le gisement de Green River (à cheval sur le Colorado, l'Utah et le Wyoming) contiendrait à lui seul 320 milliards de mètres cubes d'huile de schiste (dont 20 récupérables avec les techniques actuelles et 80 espérées avec des techniques améliorées (soit plus de la moitié des réserves mondiales connues).

Le deuxième gisement important est celui d'Irati (Brésil) qui renfermerait 130 milliards de mètres cubes d'huile dont huit actuellement récupérables. Une usine pilote fonctionne déjà qui, depuis 1973, produit par an 60 000 mètres cubes. Si on trouve 240 millions de dollars (estimation faite en 1973) à investir, la production annuelle d'Irati pourrait atteindre 3,65 millions de mètres cubes, plus 330 000 t de soufre.

Deux gisements de taille beaucoup plus modeste sont actuellement les seuls exploités sur un rythme industriel : un en Estonie (URSS), un en Chine.

Celui d'Estonie contient — seulement — 3 milliards de mètres cubes d'huile de schiste. La roche est particulièrement riche en matière organique puisqu'on extrait au moins 200 litres d'huile par tonne. Elle est d'ailleurs, en grande partie, utilisée directement comme combustible dans des centrales électriques. La production, grâce à la modernisation de l'exploitation par galeries de mine ou à ciel ouvert, devrait atteindre 30 millions de tonnes de schistes en 1975. L'URSS aurait d'autres gisements totalisant 18 milliards de mètres cubes d'huile récupérable.

Le gisement chinois de Fushun (300 millions de mètres cubes d'huile) est situé sous un bassin houiller et exploité à ciel ouvert. La production annuelle ne doit pas dépasser quelques millions de mètres cubes. Quant aux autres gisements chinois, leurs réserves probables sont estimées à 22 milliards de mètres cubes.

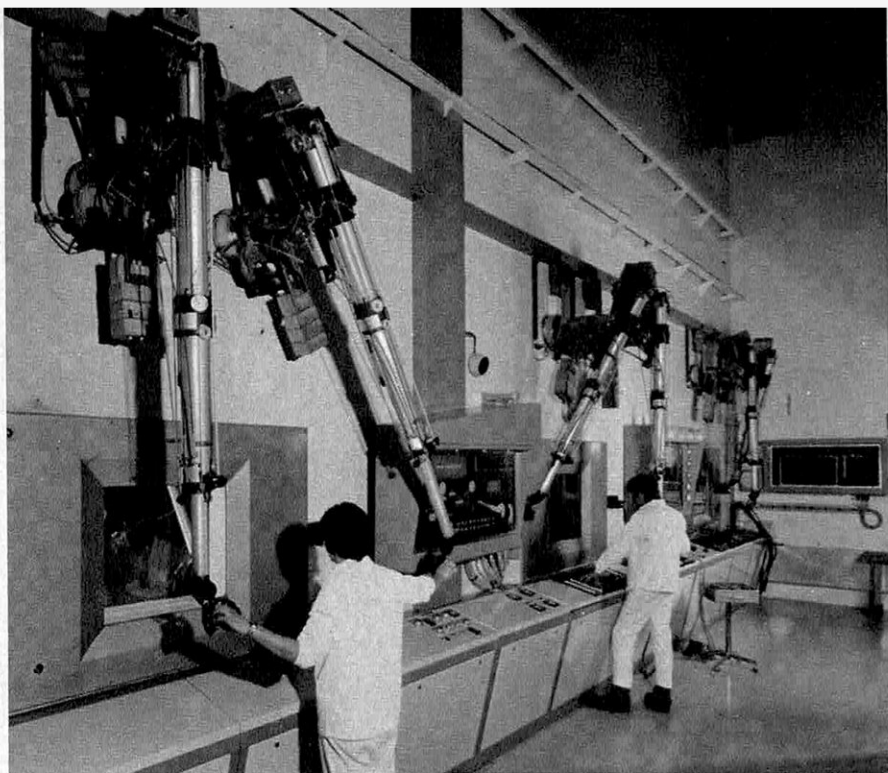
L'Europe, elle aussi, a quelques gisements de schistes bitumineux, mais peu importants, à l'exception probablement des dépôts siciliens. Quant à la France, elle fait dresser depuis le début de 1974 l'inventaire de ses ressources par une association réunissant l'IFP, le BRGM, les Charbonnages de France et les sociétés pétrolières. Les dépôts qui semblent les plus intéressants dessinent une auréole sur la bordure orientale du Bassin parisien, depuis le Luxembourg jusqu'à Avallon. Après l'inventaire, des études économiques permettront seules de juger si l'exploitation des « schistes-cartons » est rentable.

Pour tous les schistes, il existe peut-être un autre débouché. Dans les sous-produits, on pourrait trouver de la bauxite ou des terres rares.

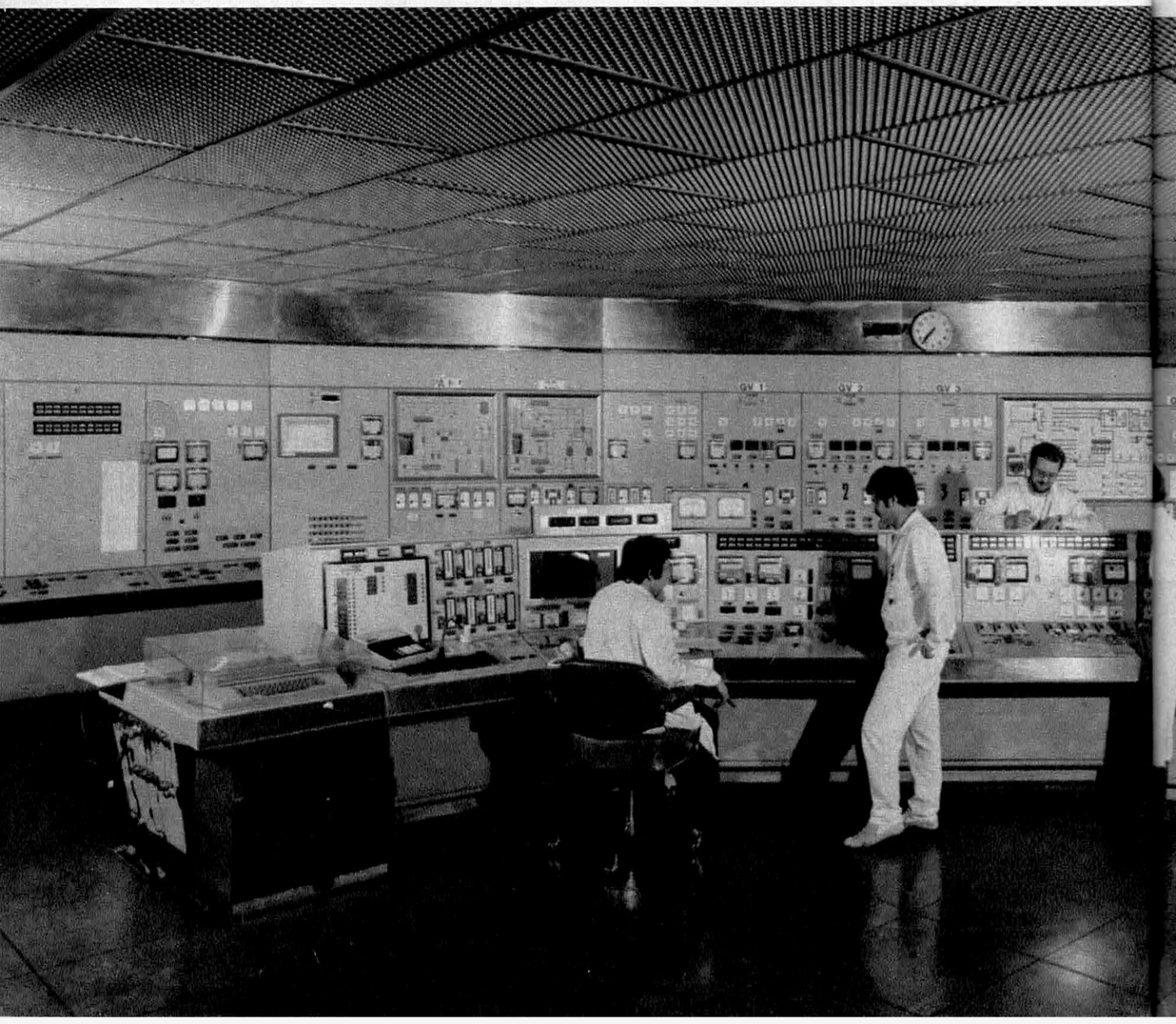
Yvonne REBEYROL

Pour longtemps encore, l'essentiel de notre énergie proviendra des exceptionnels champs pétroliers du Moyen-Orient.



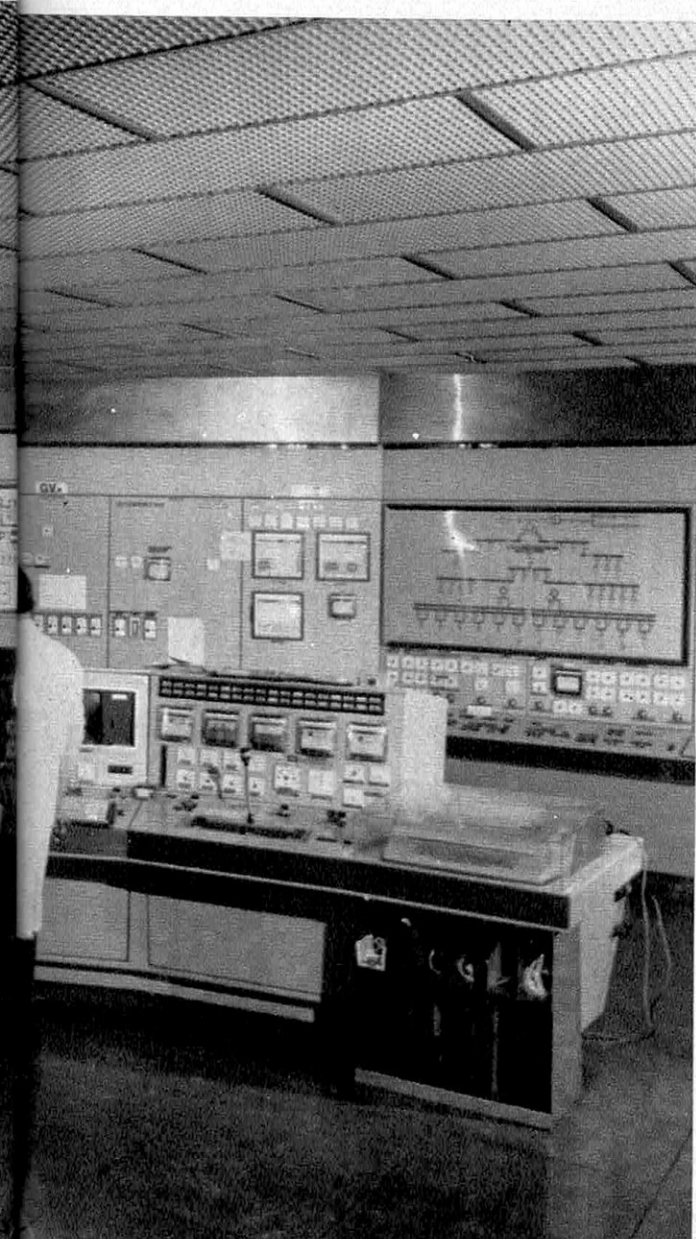


Couplé au réseau EDF depuis décembre 73, le sur-régénérateur Phénix fut ainsi le premier réacteur de ce type en service en Europe occidentale. On voit ici la salle de contrôle et une salle d'examen des combustibles irradiés.



LE NUCLEAIRE D'APRES-DEMAIN

En matière d'énergie nucléaire, le programme français est maintenant bien lancé et tout, ou presque, a été dit sur le sujet. On sait que des problèmes demeurent. Les uns, liés à la sécurité, limitent les possibilités d'implantation des centrales. Les autres sont relatifs à l'approvisionnement en combustible nucléaire. Deux grandes techniques susceptibles d'aider à tourner ces difficultés retiennent l'attention des chercheurs et des producteurs d'électricité. Les surrégénérateurs, d'une part, la fusion thermonucléaire, d'autre part.



Photothèque EDF - Michel Brigaud.

Des réacteurs surrégénérateurs de 2 000 MW : personne n'y songeait encore à la fin de la dernière décennie, au moment où Armstrong et Aldrin débarquaient sur la Lune. Et pourtant la perspective de construire avant 1990 des « breeders » de cette puissance se concrétise de jour en jour. Il convient de dire à cet égard que la performance du réacteur Phénix, qui fonctionne à pleine puissance depuis mars 1974, étonne agréablement tous les spécialistes. A commencer par ceux du CEA et d'EDF, qui ne s'attendaient pas à une réussite aussi éclatante.

Il faut bien admettre que si la technologie des surrégénérateurs suscite aujourd'hui tant d'espoir dans un monde assoiffé d'énergie, c'est en raison des caractéristiques même de ces centrales.

Efficacité, meilleur rendement (nucléaire, thermique et électrique) que tous les réacteurs actuels, économie de combustible pour les pays qui les exploiteront. Tels sont les avantages clés des réacteurs à neutrons rapides. Car, faut-il le rappeler, un breeder transforme massivement l'uranium 238, cet isotope inutile de l'uranium naturel, en plutonium 239 fissile. De ce fait, il tire d'un kilo d'uranium 50 à 60 fois plus d'énergie que les réacteurs de la génération actuelle.

En utilisant le plutonium 239 comme matière fissile, un breeder fabrique du plutonium 239 nouveau en quantité supérieure à celle qu'il consomme. En réutilisant le plutonium formé pour en fabriquer à nouveau davantage et en rééditant l'opération, on peut donc parvenir à utiliser intégralement l'uranium naturel. L'énergie disponible dans l'uranium peut ainsi être multipliée par un facteur de l'ordre de 100 ! Oui, les performances des réacteurs à neutrons rapides sont décidément faites pour séduire les planificateurs de l'énergie.

C'est bien pour cette raison qu'une concurrence

suite page 38

*Si les pays producteurs
commencent à s'équiper,
la plus grande partie
de la capacité de raffinage
est encore implantée
sur les lieux de consommation
ou à proximité.*





rence assez âpre oppose principalement la France, la Grande-Bretagne, l'Union Soviétique et les Etats-Unis, lesquels, partis curieusement les premiers en 1946, sont maintenant bons derniers dans la course. Il n'est d'ailleurs pas impossible que les problèmes de sécurité et de protection de l'environnement contribuent à ralentir encore le programme américain et peut-être même les programmes européens. On verra plus loin pourquoi.

L'état d'avancement des projets les plus récents vaut d'être examiné, car il tend à démontrer que la France aurait repris, grâce à Phénix, l'avance considérable dont elle disposait voici cinq ans.

En Union Soviétique, la centrale de Shevtchenko, construite de 1964 à 1972 sur les bords de la mer Caspienne, a en effet été arrêtée après le grave accident d'octobre 1973. Mise en service peu de temps auparavant, la centrale soviétique a été victime d'une avarie importante de son système de refroidissement.

Dans un réacteur surrégénérateur, en effet, l'activité de fission à l'intérieur du cœur est bien plus intense que dans un réacteur classique, et la quantité de chaleur à évacuer du cœur très compact est importante au point de nécessiter une circulation abondante et rapide de sodium liquide dont la température est portée à 550°.

Il s'est produit à Shevtchenko l'accident que redoutent tous les constructeurs de surrégénérateurs, à savoir une violente explosion provoquée par l'entrée en contact du sodium brûlant du circuit secondaire avec l'eau du générateur de vapeur. Aucune fuite de matières radioactives ne s'est produite puisque le circuit primaire de sodium n'était pas en cause. Mais les Soviétiques ont dû précipitamment arrêter le BN-350 et ils seraient en train de contrôler minutieusement la construction de la future centrale BN-600 de Bielyarsk.

D'une puissance thermique de 1 430 MW, le BN-600 produira 600 MW électriques et différera du BN-350 par sa conception. C'est en effet la solution française et anglaise, avec circuits primaires de sodium intégrés à l'intérieur de la cuve du réacteur, qui a été choisie.

L'Europe occidentale, maillot jaune?

Les experts s'accordaient pour dire, avant l'accident de Shevtchenko, que l'URSS avait pris définitivement la tête parmi les pionniers du neutron rapide. Il semblerait que l'Europe a à nouveau enfilé le maillot jaune, grâce notamment aux projets échafaudés par l'Allemagne, l'Italie et la France.

Les producteurs d'électricité et les industriels de ces trois pays vont en effet investir quelque 2 000 millions de francs dans la construction d'un premier exemplaire de Super-Phénix. Devant être construit à Cheys-Malville, dans l'Isère, Super-Phénix aura une puissance électrique de 1 200 MW et devrait théoriquement entrer en service en 1981. La RWE (Rheinische

Westfälische Elektrizitätswerk) financera 16 % des travaux, l'ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) apportera une contribution de 33 %, et EDF participera à concurrence de 51 %.

Du côté des industriels, tout est prêt. Deux groupements ont été constitués : en France, le G.N.R. (*Groupement neutrons rapides*) a été formé par CGE — Alsthom et Fives-Cail-Babcock, tandis qu'en Italie le groupe NIRA (Nucleare Italiana Reattori Avanzati) se compose d'Agip Nucleare, de Ansaldo et de Fiat. C'est dans la première moitié de cette année 1975 que les producteurs d'électricité devraient normalement passer commande de Super-Phénix.

Un second surrégénérateur de même puissance sera commandé plus tard, RWE participant cette fois pour 51 %, l'ENEL pour 33 % et EDF pour 16 %. Ce réacteur sera cependant d'un modèle identique au breeder en cours de construction par les Allemands, la Belgique et les Pays-Bas. Il s'agit en l'occurrence d'une centrale à « boucle », dont les pompes à sodium et l'échangeur intermédiaire sont situés à l'extérieur du réacteur au lieu d'y être intégrés, comme dans Phénix ou le futur BN-600 soviétique.

En 1979, les Allemands feront ainsi « diverger » le surrégénérateur construit avec leurs voisins belges et néerlandais à Halkar, en Rhénanie-Westphalie. Ce réacteur expérimental SNR-300, d'une puissance de 300 MW (très exactement 282 MW), aura coûté 1,7 milliard de DM, soit un peu plus de trois milliards de francs.

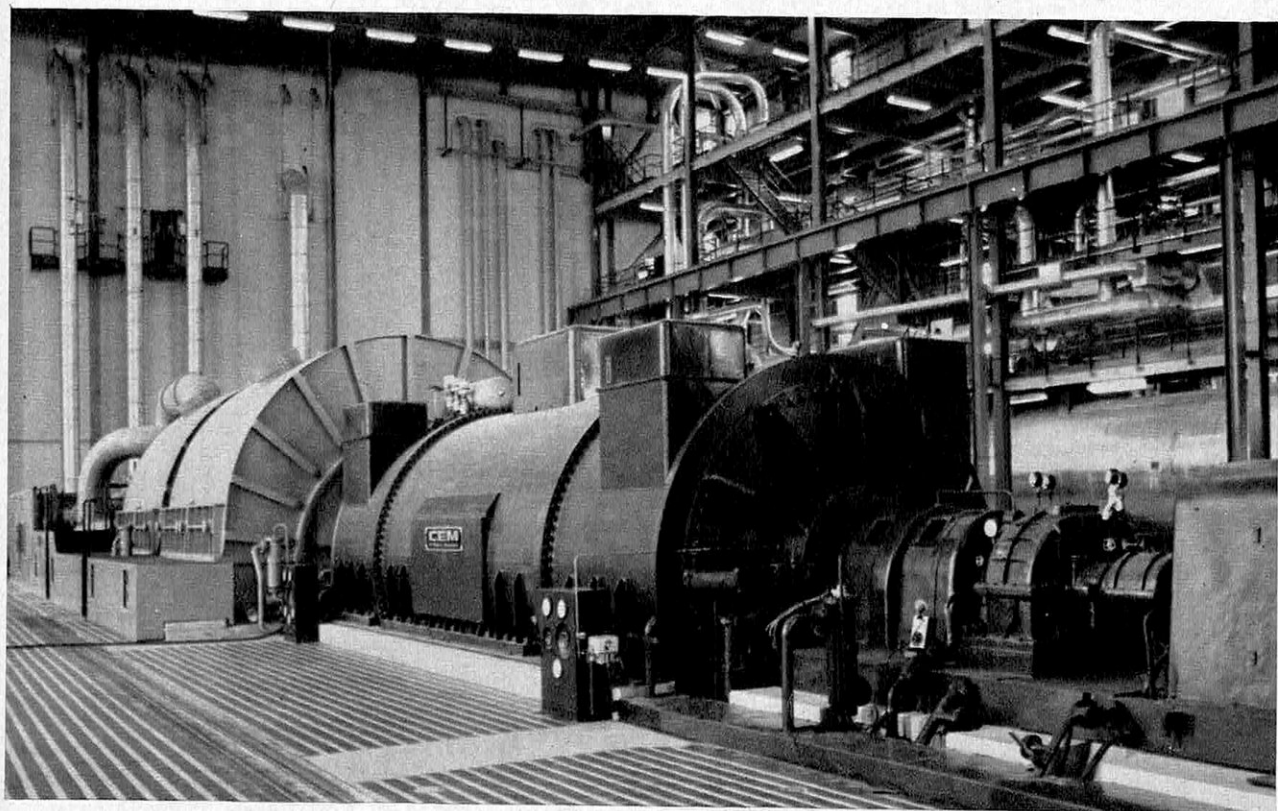
Avant-dernier dans la course aux neutrons rapides, le Japon, avec son projet Monju, un réacteur à boucle de 300 MW qui devrait théoriquement entrer en service vers 1980, notamment grâce à l'aide apportée depuis six ans par le CEA.

Le breeder est inflationniste

Les Américains, après avoir été les pionniers des surrégénérateurs grâce aux réacteurs expérimentaux Clementine, EBR-1, EBR-2, et Enrico Fermi, se sont endormis sur leurs lauriers. Ceci pour des raisons multiples : compétitivité des centrales classiques à fuel lourd, compétitivité immédiate des réacteurs à eau pressurisée et à eau bouillante, absence de préoccupations d'ordre énergétique au cours des années soixante.

Bref, c'est seulement au début de la décennie actuelle que l'Atomic Energy Commission a commencé à réclamer la mise au point d'un programme de construction de surrégénérateurs.

Ses efforts ont abouti en 1972. En janvier de cette année-là, l'AEC conclut un accord avec la célèbre Tennessee Valley Authority et la Commonwealth Edison de Chicago, pour la réalisation (à proximité du grand complexe atomique d'Oak Ridge) d'un breeder de « démonstration » d'une puissance de 350 MW électriques. Des trois industriels dans la course, c'est finalement Westinghouse qui est choisi pour construire la nouvelle centrale, les travaux devant en prin-



Photothèque EDF - Michel Brigaud.

La salle des machines de Phénix ; puissance maximale des turboalternateurs : 250 MW.

cipe débuter en 1976 pour une mise en service en 1982.

Or, un an après le feu vert, les ennuis commencent... Dans un premier temps, le coût du projet passe de 2,5 milliards de francs à 3,5 milliards. Puis, le 13 juin 1973, coup de tonnerre : la cour d'appel de Washington ordonne l'arrêt des travaux de mise au point du breeder dont elle estime « qu'il présente des dangers sans précédents pour l'environnement et la santé humaine au cours des siècles à venir ». Cette décision fait suite à l'intervention de l'écologiste Barry Commoner et de nombreux et éminents hommes de science américains.

Les arguments de ceux que les breeders inquiètent méritent d'être soigneusement étudiés car ils risquent, à terme, de remettre en cause l'avenir même de ce type de réacteur.

Le plutonium en question

Premier grief : les surrégénérateurs produiront des quantités importantes de plutonium, qui est l'une des substances les plus toxiques sur la terre, ainsi que l'instrument rêvé de la dissémination des armes nucléaires. « Outre le fait que la période du plutonium 239 est de 24 000 ans, estime un expert, il suffirait d'une seule tonne environ de ce poison, répandue accidentellement, pour donner le cancer du poumon à des centaines de milliers de personnes. Et on prend le risque, avec les breeders, de laisser transporter partout des milliers de tonnes de plutonium... ». Autre remarque : les surrégénérateurs concentrant une formidable quantité d'énergie thermique dans un espace réduit, le refroidissement et le contrôle de

la réaction de fission posant alors de sérieux problèmes de fiabilité des composants. Les risques d'explosion à la suite d'un contact sodium — eau ont été mis en évidence à Chevtchenko.

Enfin, certains experts ont mis en doute la capacité des surrégénérateurs à produire un kilowatt-heure moins cher, ou du moins au même prix, que les centrales actuelles de type PWR ou BWR.

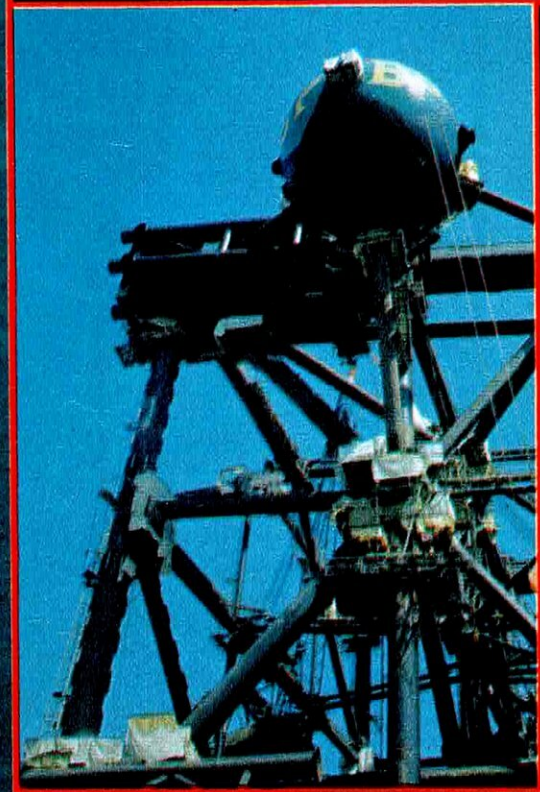
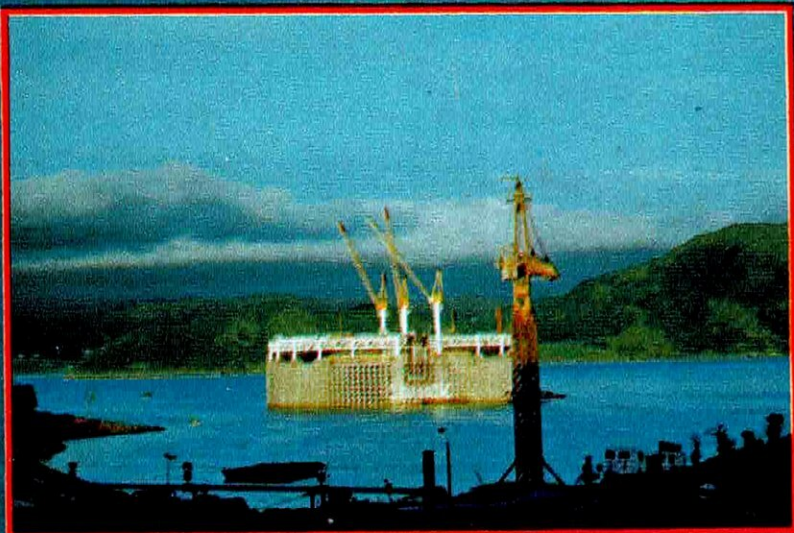
En mars 1974, l'AEC publie à son tour un volumineux rapport en cinq tomes dans lequel elle réfute les arguments des Linus Pauling, Barry Commoner, Hans Bethe (prix Nobel) et autres Lew Kowarski. « D'ici à l'an 2020, stipule le rapport, les Etats-Unis pourraient construire 550 surrégénérateurs pour 8 000 milliards de dollars et réaliser 50 milliards de dollars d'économies au niveau de la production d'énergie. De plus, ces breeders permettraient de diminuer de 4 millions de tonnes la consommation d'uranium... »

Un nouveau breeder ?

Qui a tort, qui a raison ? Sans doute la vérité se situe-t-elle à mi-chemin entre les deux clans.

Toujours est-il qu'un homme célèbre aux Etats-Unis, l'amiral Hyman Rickover, « père » des sous-marins atomiques stratégiques et actuel patron de la division des réacteurs navals de l'AEC, vient d'émettre une proposition originale qui sème le trouble dans bien des esprits. L'amiral Rickover se fait fort de transformer le réacteur à eau légère pressurisée de Shippingport en réacteur surrégénérateur à eau légère ou LWBR (Light Water Breeder Reactor), pour la somme

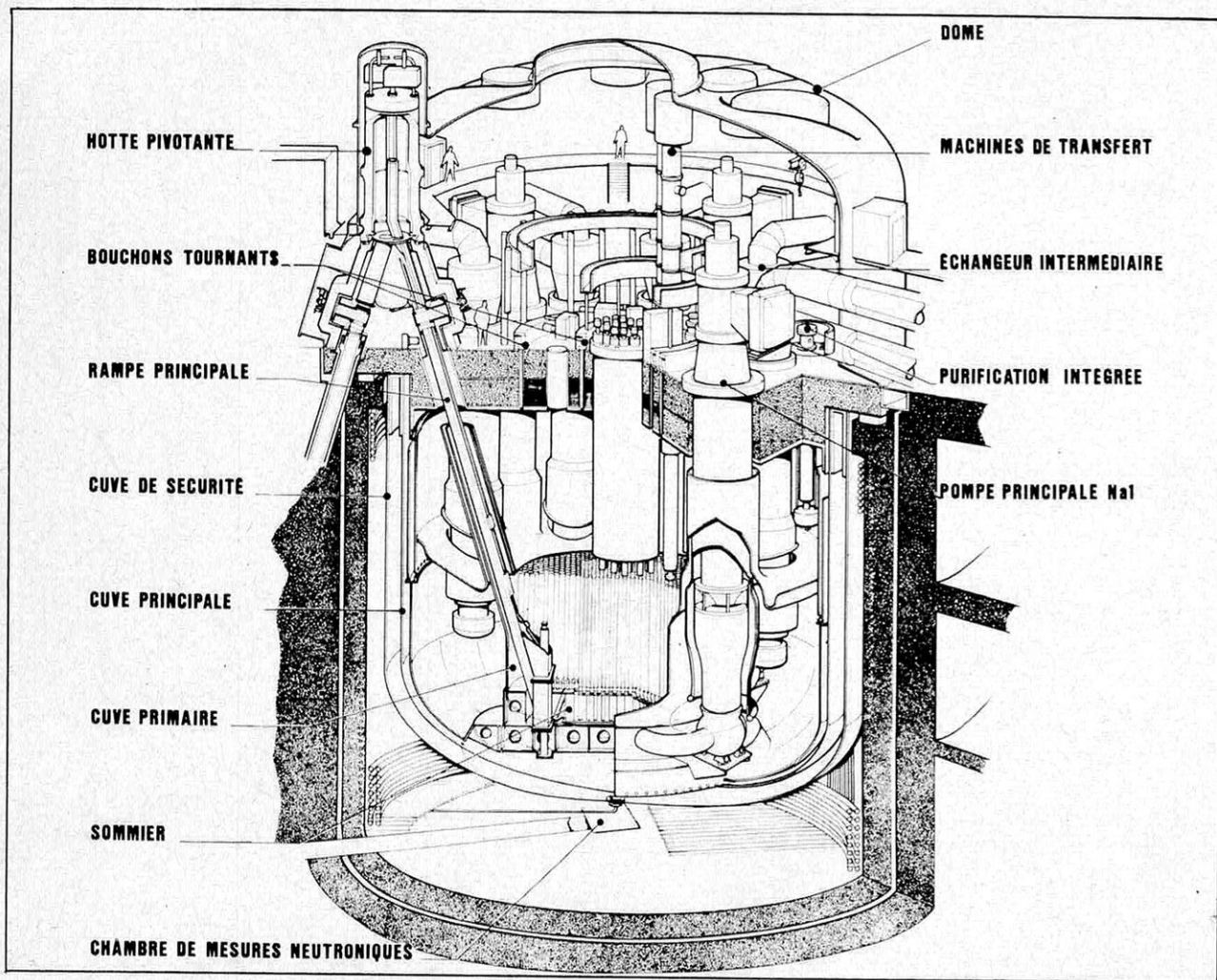
suite page 42



La mer du Nord : construite en 1966 pour la BP, la Sea-Quest est une plate-forme semi-submersible à trois piles. Son tablier domine l'eau de 35 mètres. En haut à gauche, le réservoir Doris, en voie d'achèvement dans le fjord de Stavanger. Au-dessous, un aspect d'un des « monstres », plates-formes de production destinées au champ de Forties. Elles ont été construites par une association où figure la société française ETPM. La « boule » est un ballast de 15 m de diamètre destiné à freiner le basculement de la plate-forme lors de sa mise en place.







Super-Phénix, construit en coopération européenne, atteindrait 1 200 MW de puissance électrique.

de un milliard de francs. Il s'agirait de remplacer l'uranium légèrement enrichi du réacteur par une charge contenant de l'uranium 233 — autre isotope fissile de l'uranium — et d'entourer cette charge d'un manteau de thorium.

Soumis au bombardement des neutrons provenant des atomes d'uranium 233, le thorium 232 se transmute en effet en uranium 233, tant et si bien qu'il suffit de rajouter du thorium à certaines périodes pour entretenir la réaction. « Or, affirme l'amiral Rickover, l'Amérique a suffisamment de thorium pour les siècles à venir ».

Les chercheurs des Bettis Laboratories de Westinghouse ont en effet découvert que l'uranium 233 émet un neutron capable de transformer un isotope fertile en isotope fissile à une vitesse moins grande que dans un breeder normal. Cela est capital dans la mesure où l'eau d'un PWR constitue un puissant ralentisseur de neutrons.

Du coup, les chercheurs ont imaginé de faire appel à un cœur en zirconium faiblement ralentisseur, au lieu du classique acier inoxydable, et de resserrer considérablement les gaines de combustible afin de diminuer les quantités d'eau faisant obstacle au déplacement des neutrons.

Avantage fantastique de la formule : on élimine les barres de contrôle et l'arrêt du réacteur s'obtient par simple abaissement des gaines de combustible ! Inconvénients : la masse initiale de combustible permettant d'avoir suffisamment d'uranium 233 est double de celle d'un surrégénérateur normal. Le réacteur de l'amiral Rickover devrait par ailleurs être doté d'un réflecteur à neutrons très volumineux qui réduirait l'espace disponible pour le combustible. « Ce dernier inconvénient serait pratiquement éliminé sur tous les PWR de 800 MW ou plus que l'on transformerait en breeders à eau légère » affirme cependant William Wegner, le collaborateur immédiat de l'amiral.

Il faut dire que la transformation d'un PWR en LWBR ne reviendrait qu'à 25 millions de dollars et que sans sodium et sans plutonium, les problèmes de sécurité seraient bien plus facilement résolus...

Aucune décision n'est encore prise à l'heure actuelle. La bataille fait rage aux Etats-Unis pour savoir s'il faut donner ou non une chance à « l'outsider » de l'amiral Rickover. Une seule chose est certaine : le devis du breeder d'Oak Ridge est passé, en septembre dernier, à 8,65 milliards de francs !

LA FUSION CONTROLÉE

L'autre source d'énergie vers laquelle se tournent les yeux des nations développées est la fusion thermonucléaire contrôlée.

Que d'espoirs n'a-t-on pas émis à son sujet depuis vingt ans ? Que de déceptions n'a-t-on pas enregistrées dans le même temps ?

Depuis 1951, année de l'explosion de la première bombe H, les physiciens du monde entier ont construit bien des machines dans le but de parvenir à domestiquer les réactions de fusion thermonucléaire. Et l'homme s'est pris à rêver du jour où il pourrait coupler des réacteurs à fusion sur ses réseaux...

Ce sont sans nul doute les Soviétiques qui ont acquis les premiers une importante expérience dans ce domaine où tout demeure lié aux progrès de la recherche fondamentale. Avec leurs *tokamaks*, les équipes de l'Institut Kourtchakov, dirigé par le professeur Lev A. Artsimovitch, ont en particulier réussi une série d'expériences qui ont incité les Etats-Unis et la France à se doter aussi de tokamaks...

Les données du problème posé aux chercheurs sont au fond très simples. Il s'agit de rapprocher suffisamment deux noyaux d'atomes légers (deutérium, tritium, lithium), de les combiner en un seul noyau et de libérer l'énergie provoquée par cette fusion. Or, chaque noyau est entouré d'une barrière protectrice due à sa charge électrique qui repousse les autres noyaux. Le tout est de réussir à franchir cette barrière en multipliant les occasions de rencontre des noyaux à très haute température.

Le professeur Artsimovitch estime ainsi que, dans un mélange deutérium-tritium, des réactions de fusion peuvent s'amorcer quand le plasma obtenu à l'intérieur d'un tokamak atteint une température de l'ordre de 50 millions de degrés. Pour un plasma de deutérium pur, la température indispensable est de 200 millions de degrés.

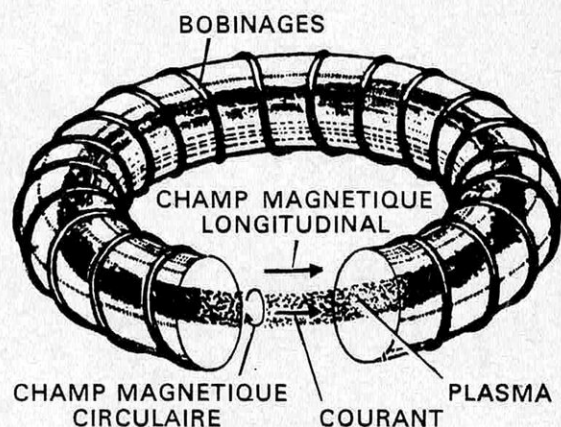
Les problèmes essentiels

Parmi les difficultés auxquelles se heurtent les chercheurs, il en est deux qui sont de taille : la difficulté de confiner un plasma dans l'espace, et celle de le faire durer suffisamment pour que les réactions de fusion puissent avoir lieu. Lorsqu'ils sont portés à très haute température, les ions et les électrons sont animés de mouvements extrêmement désordonnés et se déplacent à des vitesses prodigieuses, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Ils échappent ainsi au confinement, viennent heurter les parois de la machine, perdent leur énergie, et le plasma refroidit instantanément.

A 100 ou 200 millions de degrés, les pressions exercées sur les anneaux des tokamaks atteignent par ailleurs des centaines de kilos par centimètre carré.

Le problème du chauffage du plasma est loin d'être résolu : avec le courant électrique que l'on fait passer dans l'hydrogène sous forme d'une formidable et courte décharge, grâce à la variation d'un puissant champ magnétique extérieur, on ne peut guère espérer dépasser quelques dizaines de millions de degrés.

C'est ainsi qu'en avril 1969, l'équipe du professeur Artsimovitch réussit à porter un plasma d'hydrogène contenant cinquante mille milliards de noyaux par centimètre cube à la température de cinq millions de degrés pendant deux centièmes de seconde. La performance, vérifiée par des savants britanniques, fut réalisée dans



Un courant circulant à l'intérieur du plasma caractérise le système de confinement Tokamak.

le tokamak T-3. « Pour atteindre l'Eldorado de la fusion, déclarait alors Lev Artsimovitch, il faudra multiplier les températures par 20, obtenir des densités de plasma 50 fois plus élevées et des temps de confinement 100 fois plus longs... »

Des progrès certains

Depuis, des progrès importants ont été réalisés : en mars 1973, des chercheurs japonais réussissent à provoquer un phénomène de fusion pendant deux centièmes de seconde, en confinant un plasma de sept millions de degrés ayant une densité en deutérium de dix mille milliards de particules par centimètre cube.

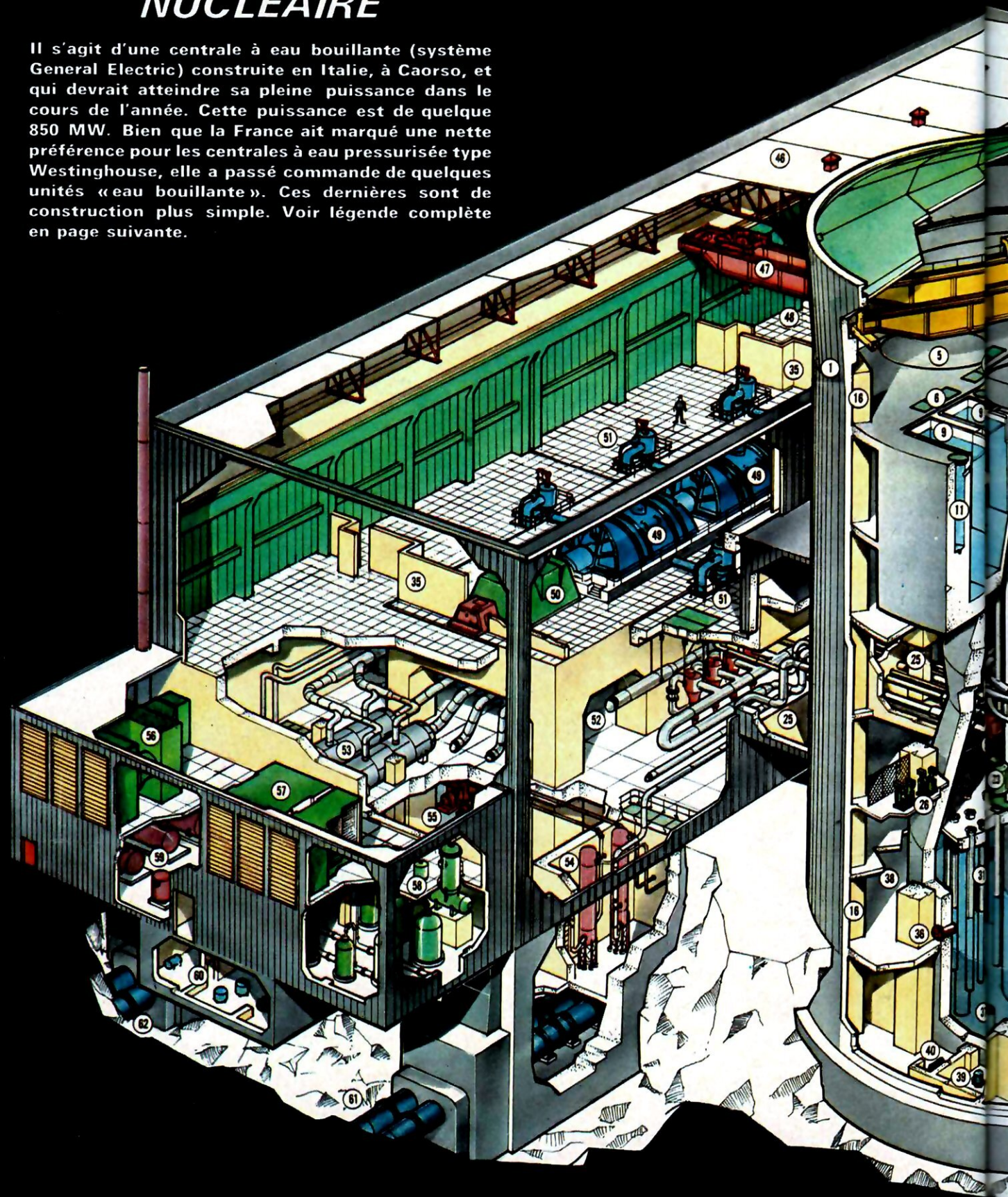
Mais on est, hélas, encore loin de réunir les conditions idéales définies par le physicien britannique J.D. Lawson, à savoir que le bilan énergétique d'une expérience de fusion deutérium-tritium sera positif lorsque le produit de la densité du plasma (en nombre de particules par centimètre cube) par le temps de confinement (en secondes) dépassera 10^{14} , pour une température de 100 millions de degrés...

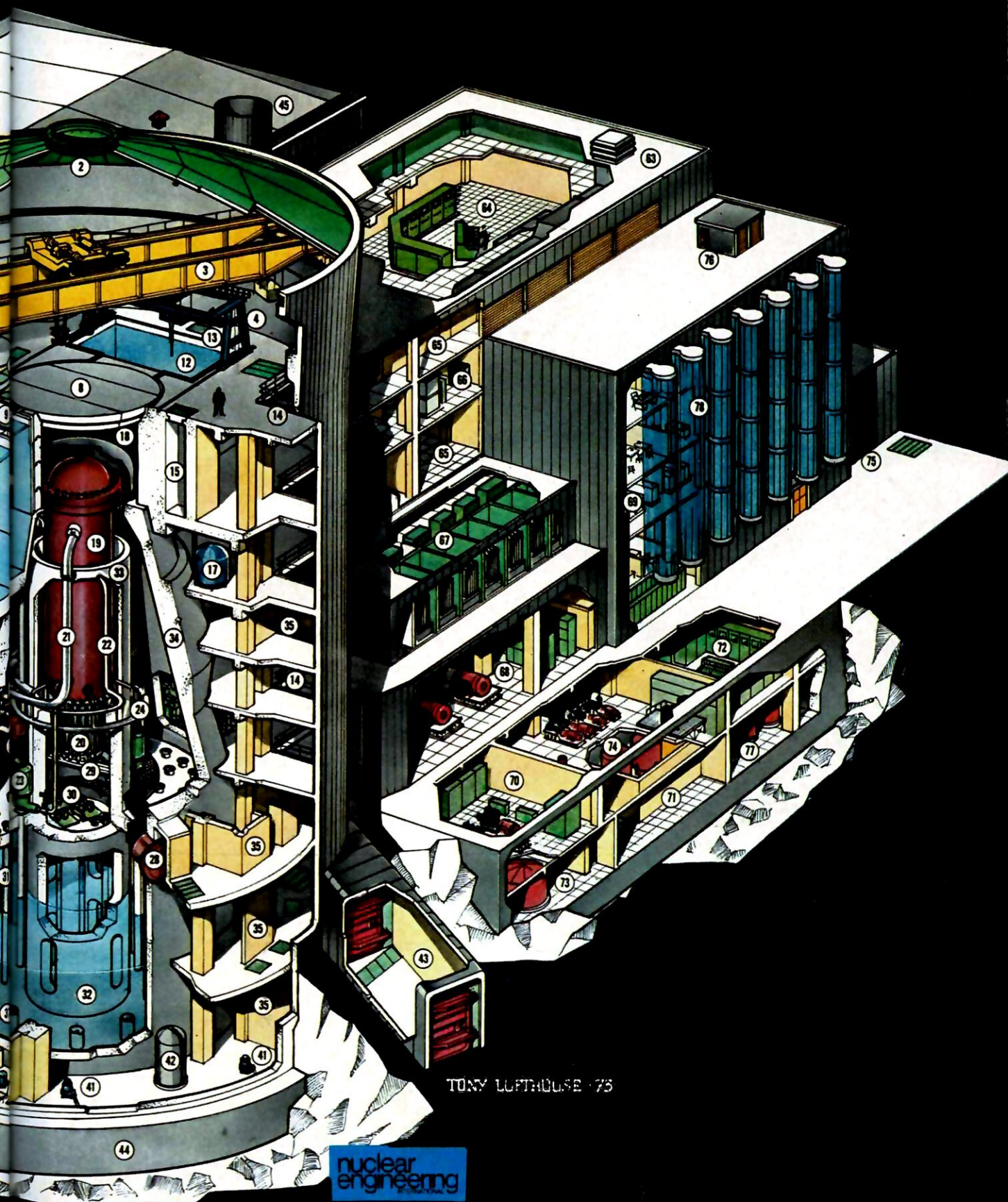
Récemment, les équipes du CEA travaillant sur le tokamak de Fontenay-aux-Roses, annonçaient cependant une nouvelle performance : un

suite page 46

UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

Il s'agit d'une centrale à eau bouillante (système General Electric) construite en Italie, à Caorso, et qui devrait atteindre sa pleine puissance dans le cours de l'année. Cette puissance est de quelque 850 MW. Bien que la France ait marqué une nette préférence pour les centrales à eau pressurisée type Westinghouse, elle a passé commande de quelques unités « eau bouillante ». Ces dernières sont de construction plus simple. Voir légende complète en page suivante.





Une centrale nucléaire

- 1 - bâtiment du réacteur
- 2 - purge
- 3 - grue 100 tonnes
- 4 - pont roulant de recharge
- 5 - accès à la tête de l'enclinte
- 6 - soute à combustible de recharge
- 7 - accès à la ventilation de l'enclinte
- 8 - trappe de fermeture
- 9 - piscines pour combustible irradié
- 10 - fermetures
- 11 - trop-plein
- 12 - piscine de stockage
- 13 - déminéraliseur
- 14 - arrivée combustible
- 15 - préfiltre de l'eau de refroidissement
- 16 - monte-charges
- 17 - séparateur de vapeur
- 18 - tête de l'enclinte du réacteur
- 19 - cuve du réacteur
- 20 - mécanisme des barres de contrôle
- 21 - sortie principale de vapeur
- 22 - arrivée d'eau
- 23 - pompe de recirculation
- 24 - boucle de recirculation
- 25 - sortie des conduits vapeur
- 26 - commandes barres de contrôle
- 27 - accès au réacteur
- 28 - accès des équipements
- 29 - plate-forme d'accès aux barres de contrôle
- 30 - pompe d'assèchement
- 31 - plongeurs de vapeur
- 32 - piscine de désactivation
- 33 - caisson en béton
- 34 - enclinte en béton
- 35 - mur-écran
- 36 - accès au contrôle de la désactivation
- 37 - pilier de support
- 38 - refroidissement de l'enclinte
- 39 - pompe de refroidissement de secours du cœur
- 40 - pompe d'assèchement du bâtiment
- 41 - pompe de refroidissement
- 42 - échangeurs de chaleur
- 43 - sas d'accès au bâtiment
- 44 - soubassement
- 45 - cheminée de ventilation
- 46 - bâtiment des générateurs
- 47 - grue 190 tonnes
- 48 - salle des turbines
- 49 - turbines basse-pression
- 50 - turbines haute-pression
- 51 - soupape vapeur basse-pression
- 52 - salle des condenseurs
- 53 - réchauffeur et séparateur de phases
- 54 - réchauffeurs haute-pression
- 55 - pompe d'alimentation des condenseurs
- 56 - ventilation du bâtiment
- 57 - ventilation du bâtiment
- 58 - traitement des eaux
- 59 - traitement des eaux
- 60 - équipements divers
- 61 - arrivée d'eau de refroidissement
- 62 - sortie d'eau de refroidissement
- 63 - bâtiment auxiliaire
- 64 - salle de commande
- 65 - salle des câbles
- 66 - salle des relais
- 67 - transformateurs
- 68 - générateurs électriques
- 69 - salle des accumulateurs
- 70 - salle des compresseurs d'air
- 71 - équipements traitement des déchets
- 72 - salle de commande traitement des déchets
- 73 - collecteur de déchets
- 74 - séparateur de phases
- 75 - sortie des déchets radioactifs
- 76 - ascenseur
- 77 - puisard
- 78 - administration

plasma d'une densité de dix mille milliards de particules par centimètre cube chauffé à 10 millions de degrés aurait été confiné pendant 0,1 s. Le tokamak de Fontenay est d'ailleurs l'un des plus perfectionnés du monde puisque, pour un rayon d'anneau de 98 cm et un rayon de cylindre de plasma de 20 cm, son champ magnétique extérieur est de 60 kilogauss.

Les savants attendent donc avec impatience l'achèvement de la construction du tokamak T-10 soviétique, et du « Princeton Large Torus » américain, et souhaitent que la construction du *Joint European Tokamak* puisse effectivement débuter en 1976.

Les tokamaks seraient en effet loin d'avoir dit leur dernier mot : le 3 octobre 1974, une équipe de physiciens de l'Université du Texas dirigée par William Drumond déclarait avoir porté, dans son « turbulent tokamak », un plasma à la température encore inégalée de 200 millions de degrés. Et l'expérience aurait été répétée de nombreuses fois, bien que sa durée n'ait pas permis d'entretenir une réaction de fusion...

L'outsider de la fusion

Parallèlement à la voie des tokamaks, les chercheurs se sont résolument engagés depuis une dizaine d'années sur le chemin apparemment prometteur de la fusion par laser.

Une fois de plus, ce sont les Soviétiques, en la personne du prix Nobel de physique Nikolaï G. Basov, qui ont accompli les premiers pas dans cette voie. Ils annonçaient en 1968 la première observation de neutrons venant d'un plasma obtenu grâce à un laser.

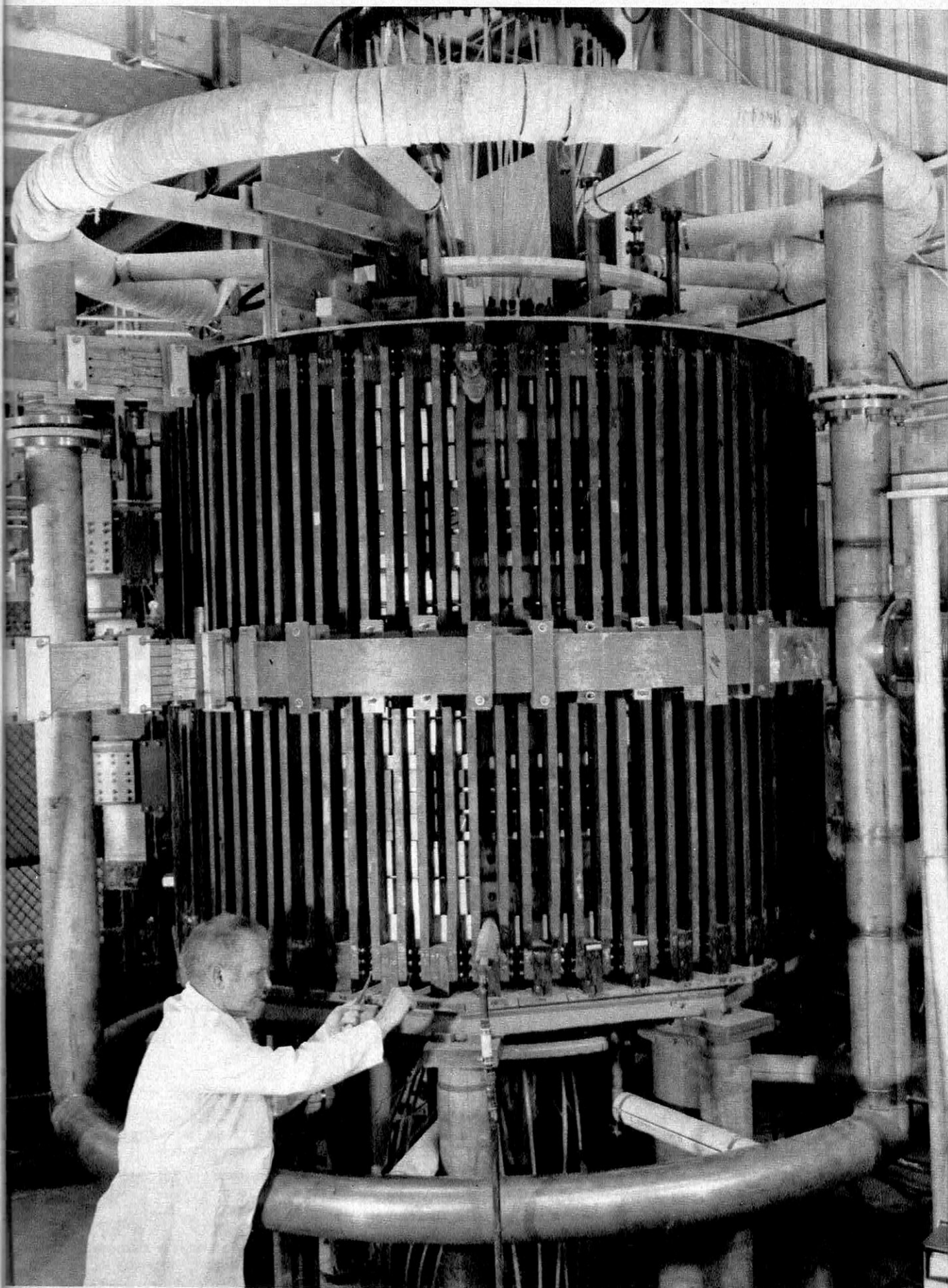
En septembre 1969, un groupe de physiciens français du CEA travaillant au centre de Limeil réussit à son tour à produire des neutrons en braquant sur un bâton de deutérium solidifié à — 269 degrés un faisceau de lumière cohérente d'une puissance de quatre milliards de watts, pendant un dix-milliardième de seconde environ.

En janvier et mai 1972, l'AEC américaine autorise la publication des résultats de travaux similaires entrepris par le désormais célèbre Lawrence Institute de Livermore (Université de Californie), notamment à l'occasion de la septième conférence internationale d'électronique quantique. Dans le monde entier c'est l'étonnement, car il apparaît très vite que les Américains ont accompli des progrès considérables. Des noms reviendront sans cesse : John Nuckolls, Lowell Wood, Albert Thiessen et George Zimmerman, qui forment l'équipe de Livermore, et celui du physicien Keith Brueckner.

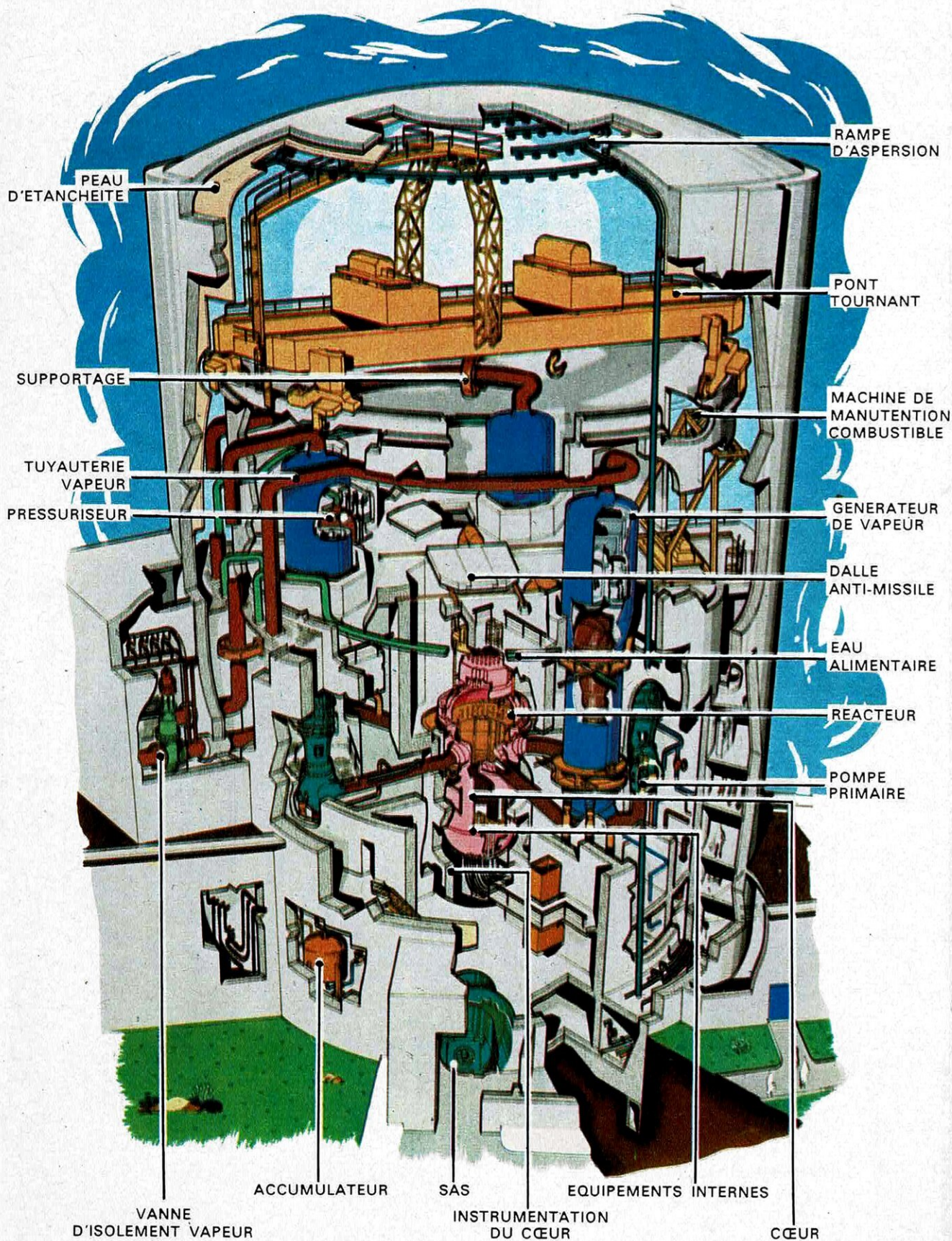
La technique américaine

Les Américains ont mis au point un fascinant scénario dont le point de départ est une goutte de deutérium solidifié à — 269 degrés, permettant d'obtenir dès le départ une densité environ 100 millions de fois plus grande que celle d'un plasma de tokamak. Cette goutte est projetée, pendant un court instant, sous vide, dans le fais-

suite page 49



Doublet II, système de confinement magnétique dérivé du Tokamak, étudié par General Atomic Co.



DOCUMENT FRAMATOME. DAVID'SON

ceau d'un très puissant laser qui porte sa température à quelque 100 millions de degrés.

Sous l'impact du faisceau lumineux, une partie de la matière est vaporisée, mais la masse ainsi éliminée produit une onde de choc qui se déplace vers le centre de la goutte, laquelle est soumise, du coup, à une fantastique pression, de l'ordre de 10^{12} atmosphères. D'où une véritable implosion de la matière, comprimée 20 fois et à la densité augmentée d'un facteur dix mille. La pastille est virtuellement transformée en « microétoile » !

En deux ans, des progrès technologiques importants ont été réalisés dans la fabrication de lasers de grande puissance, qui ont permis à l'équipe du Lawrence Institute de faire avancer un projet qui pourrait aboutir en 1977.

Il s'agira en fait d'une énorme installation expérimentale de quelque 20 m de haut, qui coûtera plus de 150 millions de francs. D'un côté, un laser de grande puissance au verre dopé au néodyme ; de l'autre, une sphère à vide où seront bombardées diverses pastilles de deutérium et de tritium. Entre les deux, un extraordinaire système de démultiplication de l'énergie du laser, composé de douze chaînes d'amplification optique permettant de concentrer sur la pastille une énergie de 10 000 joules pendant 100 à 500 picosecondes (10^{-12} seconde). Moyennant des modifications, la future machine de Livermore pourrait délivrer 50 000 joules pendant quelques nanosecondes (10^{-9} seconde).

Il n'est donc pas impossible que d'ici deux ans, l'équipe de John Nuckolls réussisse à démontrer que la fusion par laser est praticable. On n'ose imaginer les implications d'une telle percée.

Vers un réacteur opérationnel

Déjà, les caractéristiques essentielles d'un réacteur à fusion opérationnel ont été définies par les « visionnaires » du Lawrence Institute.

Une telle centrale aurait une puissance électrique d'environ un gigawatt (10^9 W), et nécessiterait l'emploi d'un laser d'environ 300 000 joules bombardant une centaine de cibles par seconde à l'intérieur d'une sphère remplie de lithium fondu à 800 degrés... Ce lithium serait animé d'un mouvement de rotation autour de son axe vertical de façon à créer au centre de la sphère un vortex au centre duquel seraient « implosées » les pastilles de combustible.

Un circuit très simple assurerait une circulation constante du lithium qui serait évacué par le bas de la sphère, dirigé vers un échangeur de chaleur lithium-vapeur d'eau surchauffée. Celle-ci alimenterait des turbines, comme dans une centrale classique.

Le bâtiment du réacteur d'une centrale à eau pressurisée et uranium enrichi type Westinghouse. Les premières unités construites en France ont complété l'équipement des centrales du Bugey et de Fessenheim.

Selon John Nuckolls, la longueur d'onde du ou des faisceaux laser devra se situer entre 3 000 et 8 000 angströms et la puissance des micro-explosions thermonucléaires atteindrait 10^7 à 10^8 joules, soit l'équivalent de l'explosion de 2,6 à 22,6 kg de T.N.T. !

Il faut noter que la contrainte mécanique imposée aux parois du réacteur par une micro-explosion thermonucléaire sera relativement faible. Une explosion dégageant par exemple une énergie de 10 millions de joules n'exercerait pas une pression supérieure à celle d'un pétard. L'explication de ce paradoxe est simple : la masse d'une pastille de deutérium n'atteint guère qu'un milligramme, soit deux millions de fois moins que deux kilos d'explosif chimique. Et l'énergie d'une onde de choc est proportionnelle à la racine carrée de la masse des débris de l'explosion.

Il n'en demeure pas moins que des chambres à implosion spéciales devront être étudiées pour résister aux neutrons, aux rayons X et au plasma créé par les réactions de fusion. Le vanadium et le lithium semblent faire partie des matières utilisables pour freiner les neutrons, les particules alpha, ainsi que les deutérons et les tritons thermiques issus de la fusion d'une pastille deutérium-tritium.

Trois milliards d'années d'énergie propre

Selon Robert Hirsh, patron du programme américain de recherches sur la fusion contrôlée, « les estimations actuelles indiquent que l'on pourrait parvenir à construire les premiers réacteurs vers l'an 2000 et que l'énergie de fusion commencerait à avoir un impact sur la production d'électricité en 2020... »

Il faut dire, avec le Dr Redan S. Pease, qui dirige depuis longtemps en Angleterre les recherches sur la fusion au Culham Laboratory de l'UKEA, que la consommation actuelle d'énergie est évaluée à 0,1 Q par an, cette consommation devant atteindre 0,5 Q en l'an 2000. Et $1 \text{ Q} = 0,25 \times 10^{18} \text{ kcal}$.

Tous comptes faits, des réserves de deutérium de 10^{10} Q permettraient à une humanité de 7 milliards d'âmes de disposer de suffisamment d'énergie propre pendant quelque trois milliards d'années. Mais les études coûteront cher : les Américains ont consacré aux recherches sur la fusion 224 millions de francs, dont 100 millions pour la fusion par laser, durant l'exercice fiscal 1974. Les Soviétiques dépensent autant sinon plus. L'Angleterre, avec son budget d'une cinquantaine de millions de francs, et la France sont loin derrière les « Grands ». Il est vrai qu'en la conjoncture économique actuelle, la recherche fondamentale n'a pas le vent en poupe.

Mais l'ironie veut qu'en pleine crise de l'énergie, on ne songe pas toujours à miser sur le procédé gagnant à terme.

Jérôme PIETRASIK

COMMENT FONCTIONNE UNE CENTRALE THERMIQUE

Une centrale thermique classique produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant du charbon ou du fuel-oil.

On peut schématiser le fonctionnement de la centrale de la manière suivante.

Si le combustible est du charbon, celui-ci est extrait du parc de stockage et transformé par des broyeurs en une poussière impalpable. Mélangé à de l'air préalablement réchauffé, il est injecté par les brûleurs dans la chambre de combustion du générateur de vapeur.

Si le combustible est du fuel-oil, celui-ci est réchauffé pour accroître sa fluidité et injecté par des brûleurs de type adapté. La chaleur dégagée par la combustion vaporise l'eau circulant dans les tubes qui tapissent les parois de la chambre de combustion.

La chaleur restant dans les gaz

de combustion est utilisée successivement :

- pour surchauffer la vapeur au sortir du générateur et resurchauffer la vapeur ayant déjà accompli un certain travail dans la turbine ;

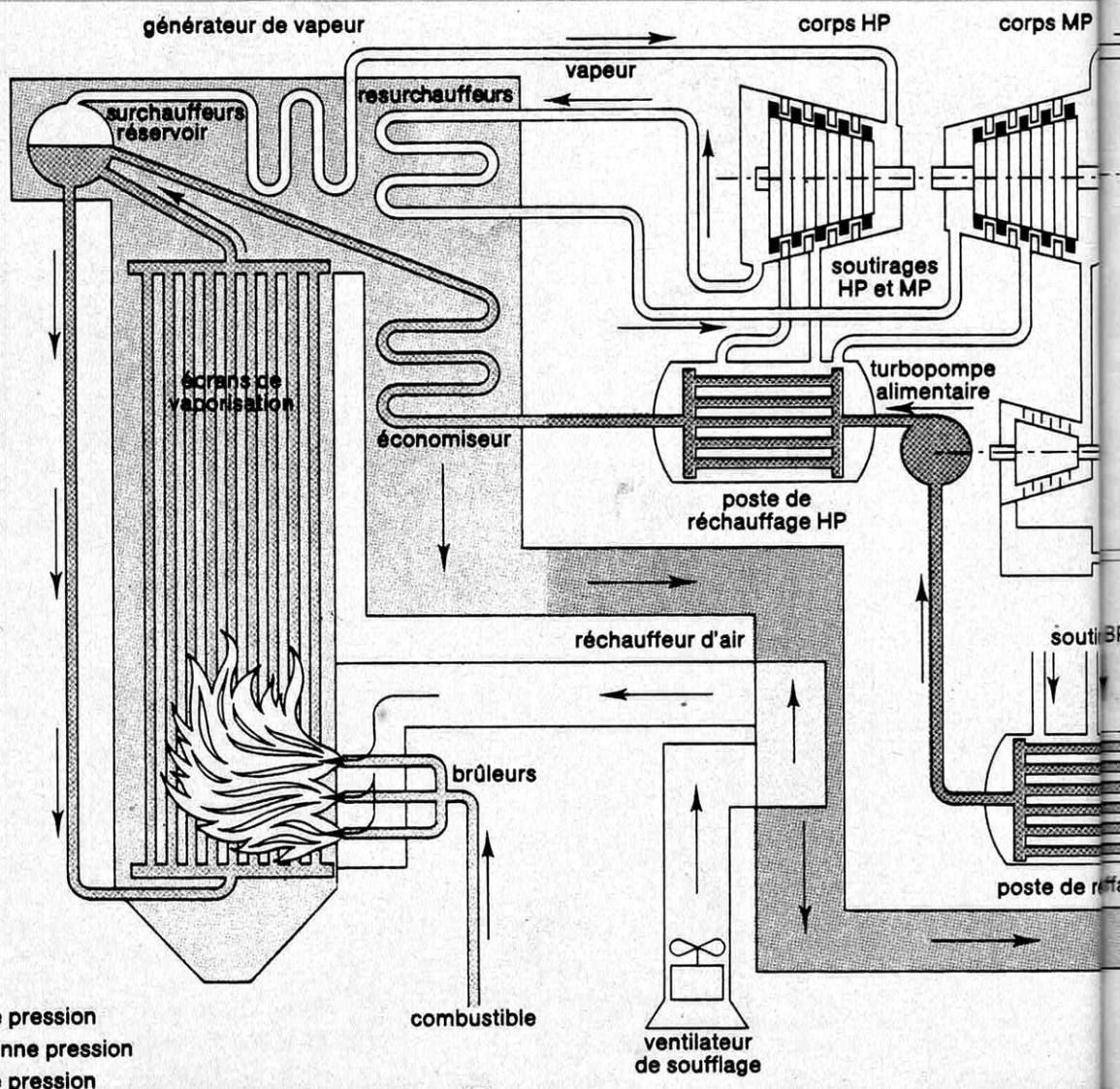
- pour réchauffer l'eau revenant du condenseur vers la chaudière (dans l'économiseur) ;

- pour réchauffer l'air avant son injection dans les brûleurs.

Dans les centrales à charbon, les gaz de combustion, avant d'être dirigés vers les cheminées, passent par de vastes dépoussiéreurs électrostatiques. Ils y perdent la quasi-totalité des cendres volantes qu'ils ont entraînées avec eux.

Dans les tubes du générateur de vapeur, l'eau, chimiquement pure, circule sous très haute pression. La vapeur produite sous l'effet de la chaleur atteint une très haute pression.

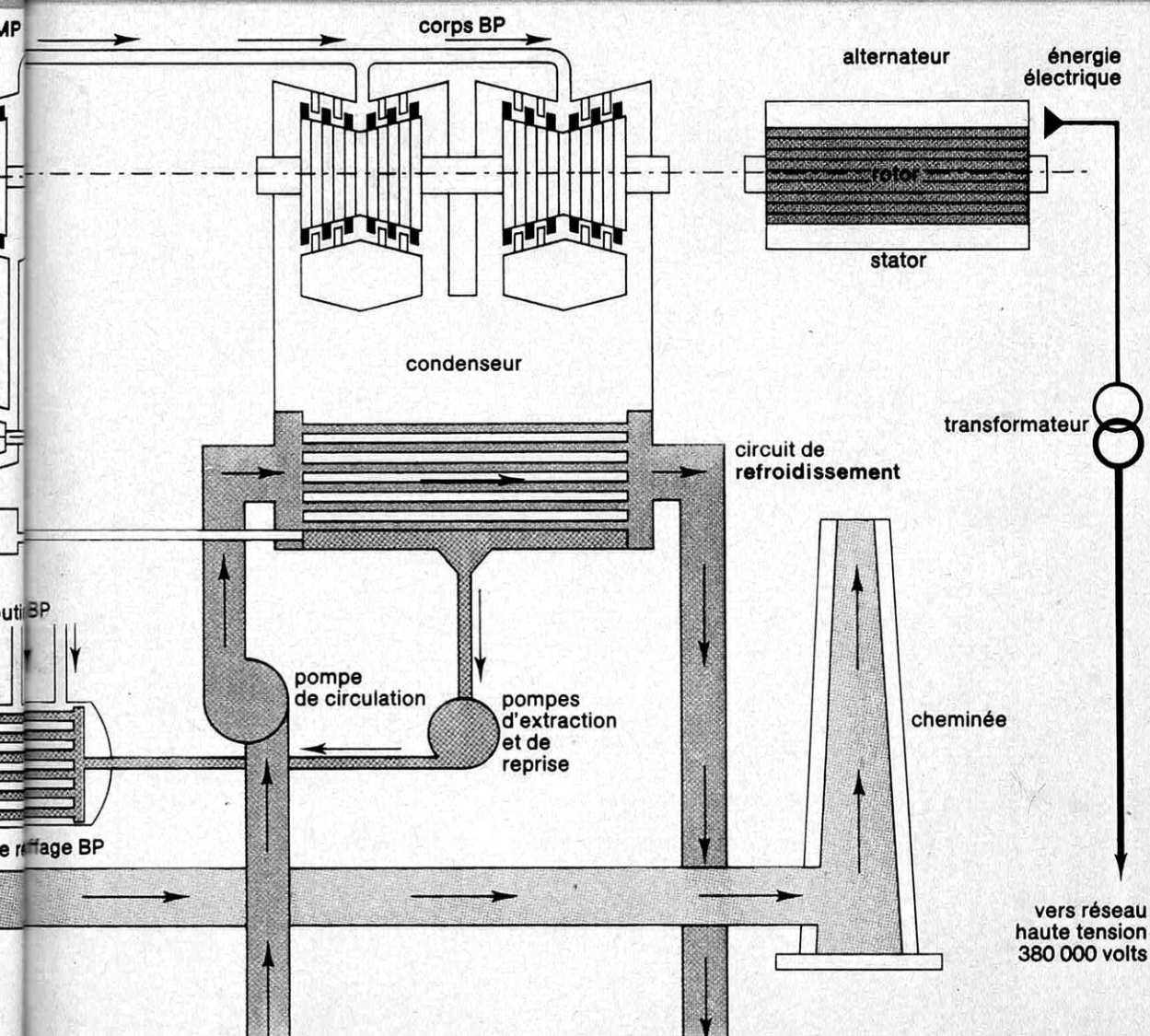
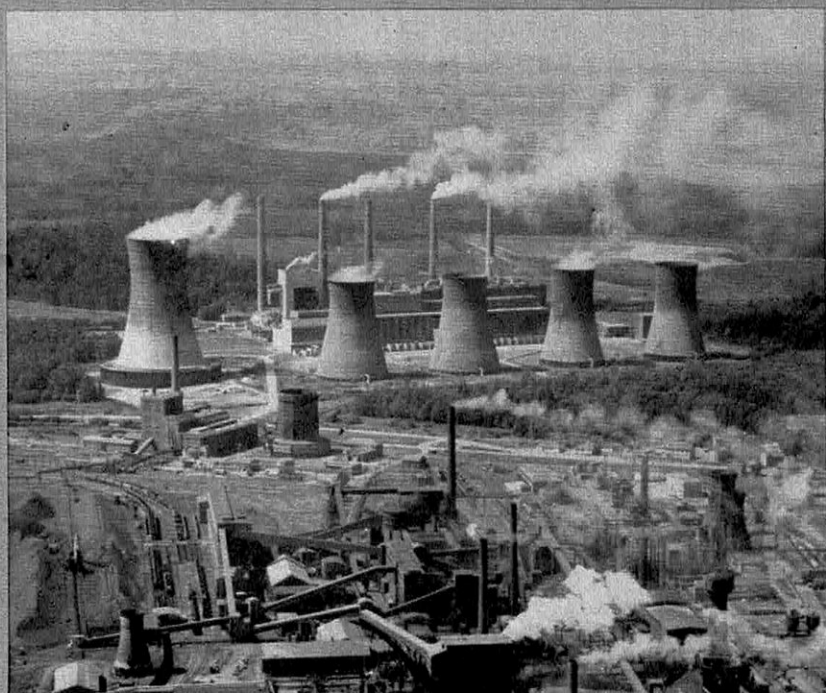
Cette vapeur se détend progres-



sivement dans les trois corps, haute, moyenne et basse pression, de la turbine. Elle va se liquéfier dans le condenseur où la pression descend tout près du vide absolu.

Du condenseur, l'eau est reprise par des pompes, réchauffée par des soutirages de vapeur au niveau des trois corps, et dans l'économiseur (par les gaz de combustion).

L'eau de refroidissement nécessaire au fonctionnement du condenseur peut être prélevée sur un cours d'eau. Elle y est rejetée après usage, à moins qu'elle ne soit recyclée par passage dans des réfrigérants atmosphériques. L'énergie mécanique engendrée par la vapeur circulant dans la turbine se transforme en courant électrique dans l'alternateur qui lui est associé. Un transformateur élève la tension du courant produit au niveau de celle du réseau de transport.



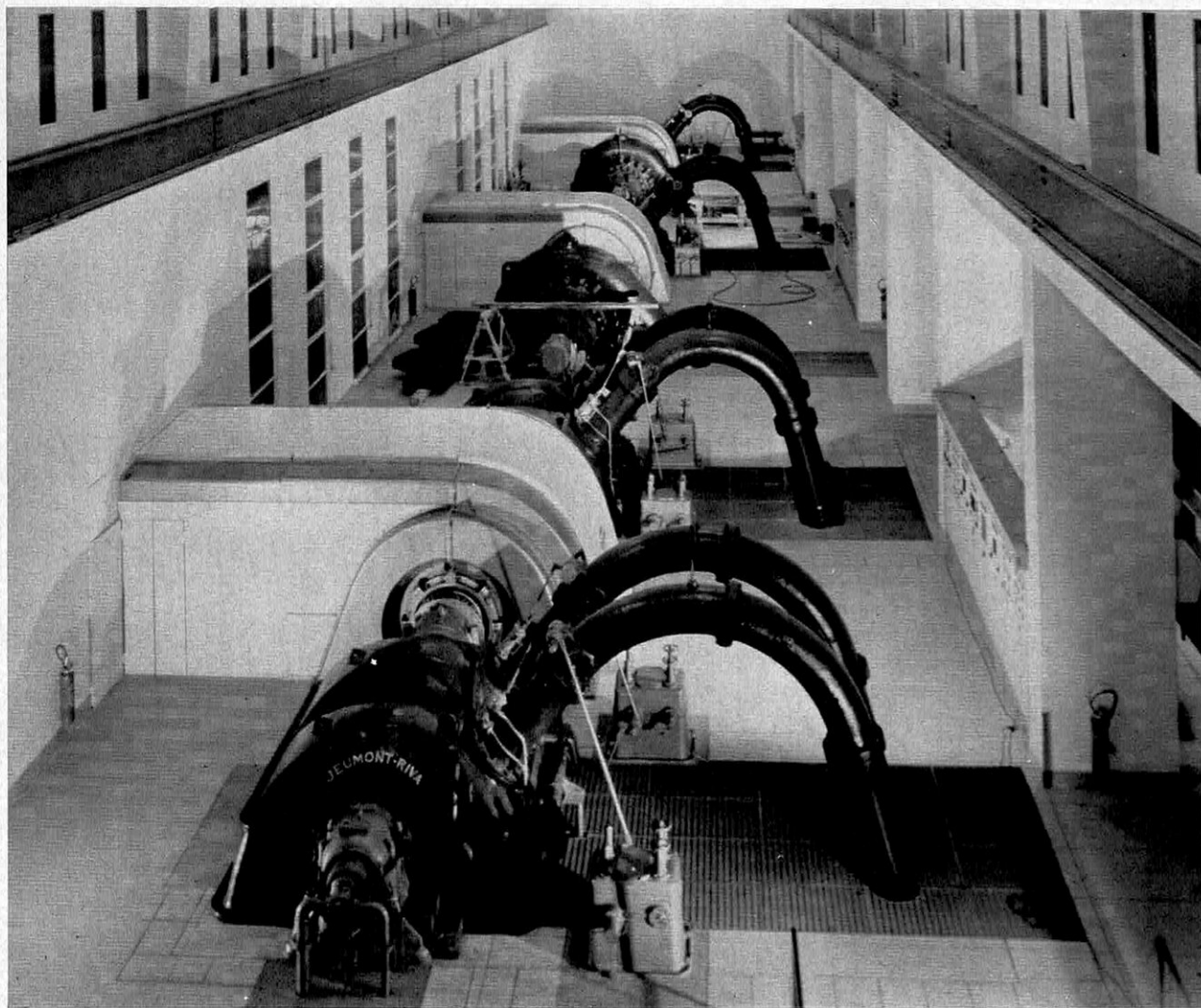


Le barrage de Vouglans



L'HYDRO ÉLECTRIQUE

A moins qu'ils ne bénéficient de conditions géographiques ou climatiques particulièrement favorables, les pays industrialisés ont vu décroître rapidement au cours des années récentes la part de l'hydraulique dans leur production d'électricité. Le nouveau calcul économique né du quadruplement des prix du pétrole ne semble pas donner un fort renouveau de chances à l'hydraulique. Il n'en est probablement pas de même dans de nombreux pays en voie de développement, encore sous-équipés en barrages et usines hydrauliques, alors que les disponibilités en eau y sont parfois considérables.



Utilisant l'énergie des chutes d'eau, les centrales hydrauliques furent les premières, dès le début du XX^e siècle, à produire industriellement de l'électricité. Aujourd'hui encore, en de nombreux pays, ce sont les chutes d'eau, les barrages, les usines hydrauliques, qui assurent l'essentiel de la production électrique : la presque totalité en Norvège ; près de 80 % en Suisse ; plus de 75 % au Canada ; quelque 70 % en Suède.

De toute évidence, les conditions géographiques, géologiques et climatologiques (abondance des sites, hauteur des chutes, volume des précipitations annuelles...) ont favorisé, dans ce domaine, les pays de montagne. En France, par exemple, la région dite des Alpes ⁽¹⁾ fournit 73 % de l'hydraulique total.

On estime pourtant que, dans la plupart des pays industrialisés, l'équipement des sites rentables sera achevé à la fin du siècle. Si on considère que la consommation d'électricité doit doubler environ tous les dix ans, le capital « houille blanche » ne peut plus satisfaire les besoins futurs des nations industrielles. En tout cas, les centrales hydrauliques offriront encore

longtemps une solution intéressante au problème de l'énergie dans les pays en voie de développement. Certains d'entre eux disposent, à l'heure actuelle, d'abondantes ressources inexploitées.

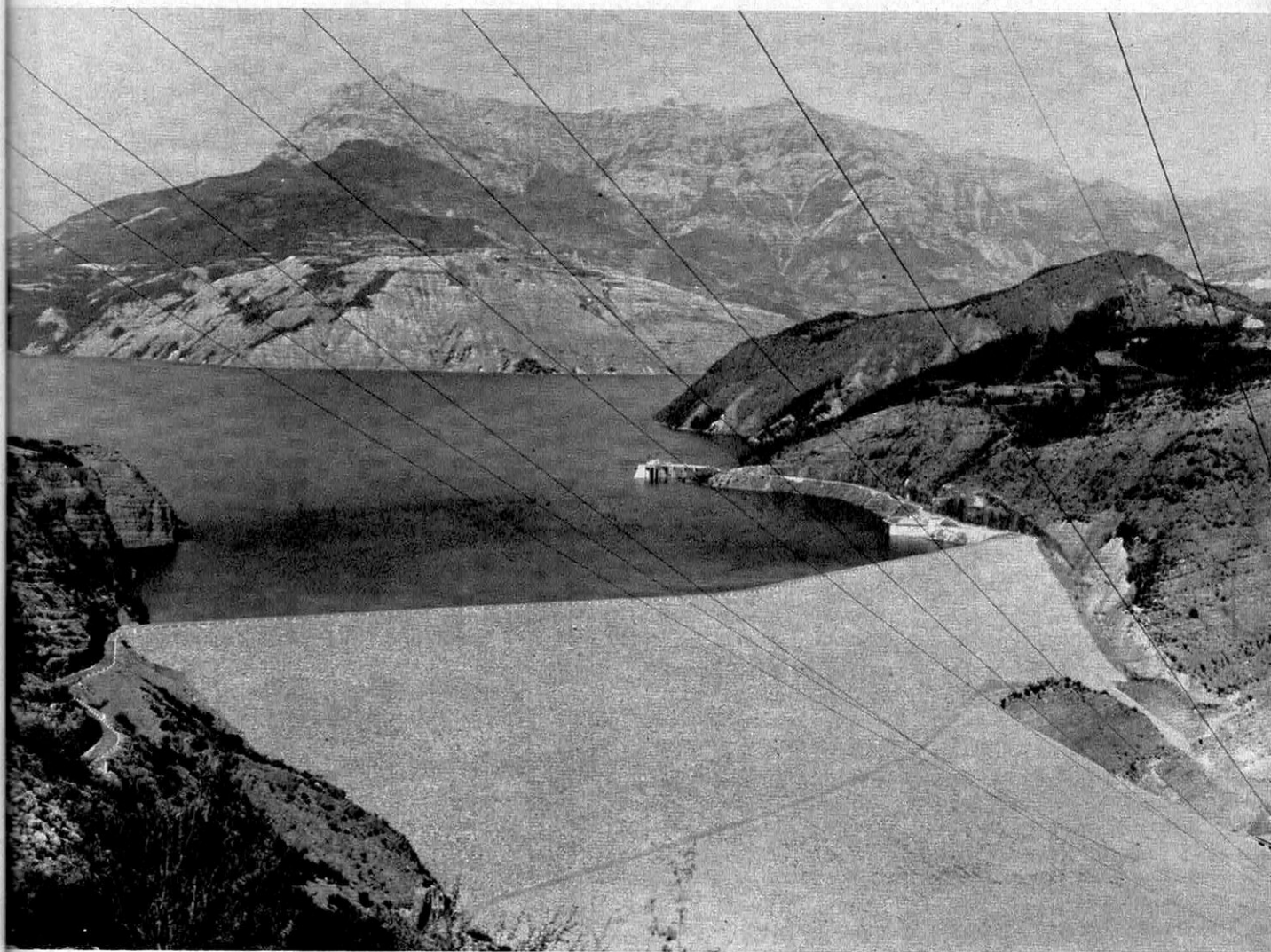
Une participation amoindrie

La France n'a pas échappé au phénomène général. Au fil des ans, la part de la production d'origine hydraulique n'a cessé de décroître. En 1960 (pour fixer les idées) l'hydraulique couvrait environ les 2/3 de la production totale d'électricité. A la fin de 1973, elle n'en assurait plus que 27 %. Ainsi, sur une production atteignant, pour l'année 1973, 174,5 milliards de kWh (ou 174,5 TWh, Terawattheures), la production d'électricité d'origine hydraulique a été de 47,5 TWh seulement.

Encore faut-il remarquer que si la capacité théorique des centrales hydrauliques françaises augmentait de 1,6 TWh dans l'année 73, l'énergie électrique réellement produite était inférieure de 2,3 % à ce qu'elle avait été l'année précédente. Dans le même temps, le thermique classique augmentait de 11,6 % et le nucléaire de 1,4 %.

Cette perte du côté de l'hydraulique n'a rien

(1) Elle englobe en fait non seulement le bassin du Rhône, mais celui du Rhin, celui de la Durance et des fleuves côtiers.



Photothèque EDF — Léo Coirier.

d'insolite, dans la mesure où l'importance et la répartition des précipitations constituent le principal facteur d'incertitude de la production hydraulique. A cet égard, l'année 1973 avait été particulièrement décevante, surtout dans les Pyrénées.

Donc, les faits bruts sont là : en 13 ans, la part de l'hydraulique dans la production totale d'électricité est tombée des 2/3 à un peu plus du quart. En chiffres absolus, pourtant, la production de l'hydraulique avait progressé d'environ 20 %, passant de quelque 40 TWh en 1960 à 47,5 TWh en 1973. Durant la même période, le thermique passait de 32 à 127 TWh, soit une augmentation de l'ordre de 400 %.

Les raisons de ce déclin sont à la fois techniques et économiques. Au 1^{er} janvier 1974, la productibilité des usines hydrauliques était de près de 58 TWh. Entendons par là le chiffre théorique de production, en l'absence de toute indisponibilité de matériel et de toute contrainte d'exploitation. Les experts estiment que le total des équipements économiquement possibles peut difficilement dépasser 64 TWh. Restent donc environ 6 TWh exploitables, sur lesquels près de 5,6 sont d'ores et déjà en construction. Ce qui revient à dire qu'à 99 et quelques décimales pour

Les gigantesques installations représentées par les barrages et les usines hydro-électriques sont coûteuses en investissements. Ceci peut être compensé par de faibles frais d'exploitation. Mais le véritable problème est que tous les sites, ou presque, pouvant être équipés en France le sont déjà. La part de l'hydraulique ne peut que se réduire.

QUELQUES GRANDES CENTRALES HYDRO-ÉLECTRIQUES

Krasnoïarsk (URSS)	5 100 MW
Bratsk (URSS)	4 500 MW
Boguchansk (URSS)	3 600 MW
Peace River (Canada)	3 150 MW
Volvograd (URSS)	2 560 MW
Kouibichev (URSS)	2 100 MW
Assouan	2 080 MW
Robert Moses (USA)	1 950 MW
Barnhart Island (Canada)	1 825 MW
Robert H. Saunders (Canada)	1 825 MW

cent près, tout ce qui peut être raisonnablement tiré du capital houille blanche l'est ou le sera avant 1980. Ainsi, avant 5 ans, tout ce qui constitue le « gisement hydraulique » de la France aura été épuisé.

Et la crise du pétrole ?

En fait, toute l'argumentation est d'ordre économique. Il est d'autres chiffres et d'autres statistiques que l'on peut avancer : *que se passerait-il, par exemple, si toutes les rivières de France sans exception étaient intégralement équipées ?* Ceci sans se préoccuper de rentabilité, de même qu'on pourrait apprécier nos réserves de charbon sans se préoccuper de leur coût d'extraction.

On arrive alors à une productibilité annuelle de l'ordre de 270 TWh, soit plus de quatre fois la productibilité « économique ».

Se pose donc le difficile problème du seuil à partir duquel « l'économiquement possible » pourrait mordre sur le « théoriquement faisable ». La réponse à ce problème est, comme on pouvait s'y attendre, imprécise.

Les spécialistes font remarquer que le coût des aménagements à construire croît de façon exponentielle. D'une part, les aménagements les plus économiques ont été réalisés les premiers et les progrès techniques ne sauraient compenser les avantages d'un site idéal. D'autre part, l'élévation progressive du loyer de l'argent grève de plus en plus lourdement les investissements à long terme que représentent les aménagements possibles.

Ainsi, le seuil de « l'économiquement possible » apparaîtrait vite défini.

Mais le quadruplement, en quelques mois, du prix du pétrole brut n'a-t-il pas changé tous les rapports de prix entre énergies ? L'EDF ne dit-elle pas que « grosse consommatrice de fuel, elle subit plus que d'autres les conséquences de la

situation nouvelle ? ». En foi de quoi, les normes de rentabilité auraient pu changer.

Mais il se trouve que, dès avant la crise du pétrole, le prix du kW installé ou du kWh produit par les centrales hydrauliques qui pouvaient, techniquement, être construites, était déjà plus cher que celui des centrales thermiques. Et, en renchérissant considérablement le prix de l'énergie électrique produite à partir du fuel, les événements récents ont conduit à établir les comparaisons avec le prix de l'énergie d'origine nucléaire.

Pour fixer les idées :

- kWh thermique : 8,2 centimes (dont 5,83 de fuel) ;
- kWh nucléaire : 4,5 centimes.

Argument décisif, les aménagements hydro-électriques qui seraient, techniquement, en mesure d'être réalisés (bien que plus chers que les centrales nucléaires) ne sont pas du tout à l'échelle des besoins d'énergie liés à l'accroissement de la consommation. Selon les experts, l'ensemble des chutes, exploitées à prix d'or, ne représenterait, en production totale, que l'équivalent d'une « tranche » de centrale nucléaire (1).

Faut-il alors rappeler que, pour faire face aux besoins des prochaines années, ce sont 13 « tranches » de nucléaire qui ont (ou vont) être mises en chantier d'ici la fin de 1975.

Fille pauvre qui ne peut donner que ce qu'elle a, l'hydraulique entend cependant, dans les années qui viennent, enrichir sa dot du mieux qu'elle peut. Les aménagements en cours — et dont les mises en services étaient prévues de 1974 à 1977 — se traduiront par une productibilité annuelle supplémentaire de 2,8 TWh.

Retaillage et grignotage

Indépendamment des créations de nouvelles usines, il est possible de mettre en œuvre quelques « expédients » au niveau des installations anciennes. Ainsi, pour nous en tenir au cas de la France, dans la perspective du passage des hivers difficiles de 1977 à 1981, le service de la production hydraulique d'EDF a fait l'inventaire des moyens qu'il lui était possible de mettre en œuvre dans un court délai pour accroître les performances du parc de centrales hydrauliques.

En fait, n'ont été retenues que des opérations modestes, sans difficulté particulière d'exécution et dont on peut raisonnablement espérer que les autorisations administratives seront obtenues assez vite. Le total des opérations ainsi recensées comme possibles dans les délais indiqués conduirait à des suppléments de 700 MW en puissance garantie et de 900 MW en puissance de pointe.

Concrètement, il s'agit d'un très grand nombre d'opérations ponctuelles, jouant sur des éléments variés. Il s'agit par exemple de l'installation de groupes supplémentaires ou d'adductions complémentaires dans des usines existantes. Il peut être question aussi de remettre en service

UN PROBLÈME D'UNITÉS

Le kilowatt-heure (kWh) est l'énergie fournie (ou consommée) en 1 heure par une puissance de 1 kilowatt (kW).

Les échelles des multiples et sous-multiples sont parallèles. En particulier :

1 watt (1 W)

1 kilowatt (1 kW) = 10^3 W

1 mégawatt (1 MW) = 10^6 W

1 gigawatt (1 GW) = 10^9 W

1 térawatt (1 TW) = 10^{12} W

1 watt-heure (1 Wh)

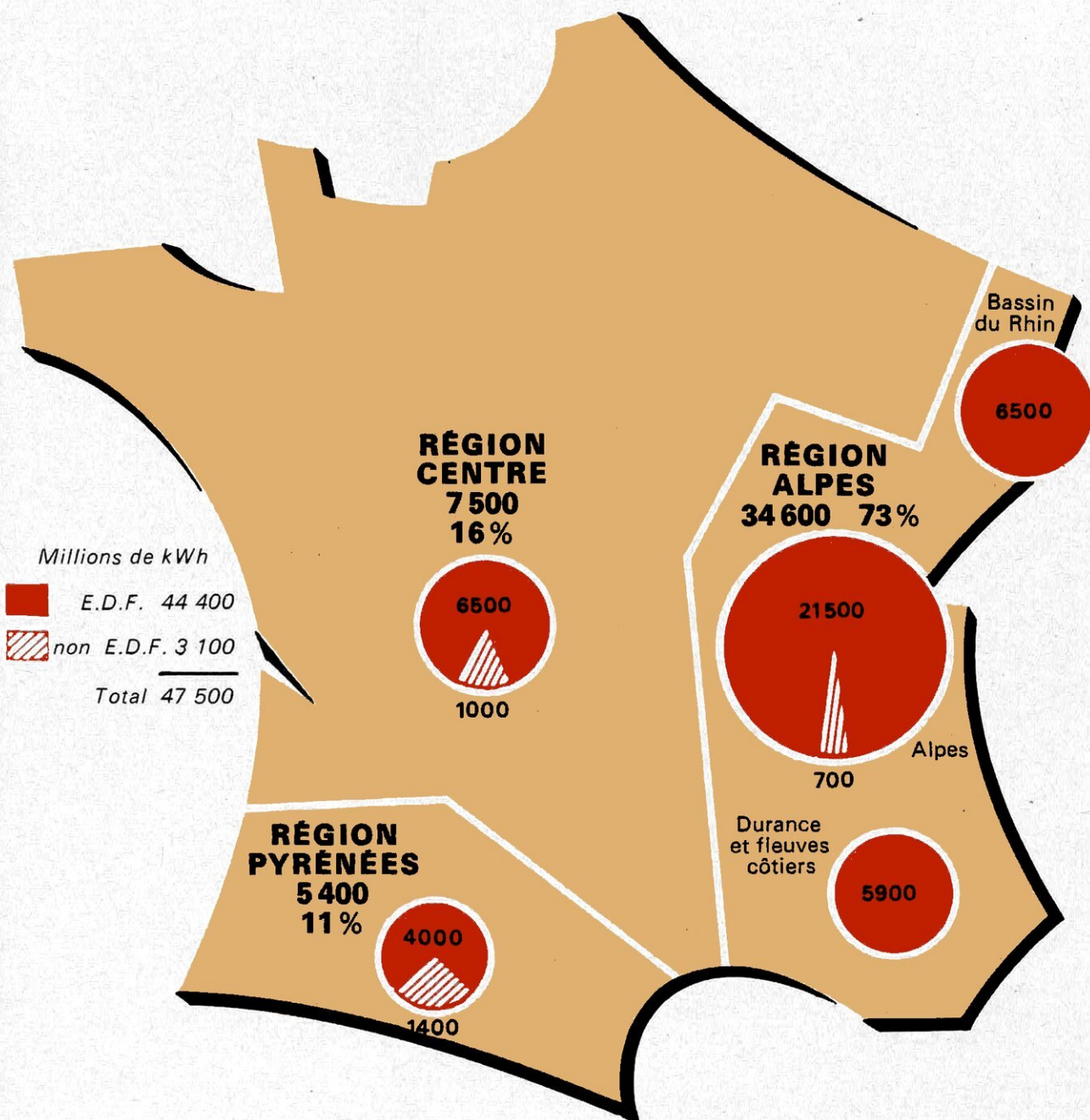
1 kilowatt-heure (1 kWh) = 10^3 Wh

1 mégawatt-heure (1 MWh) = 10^6 Wh

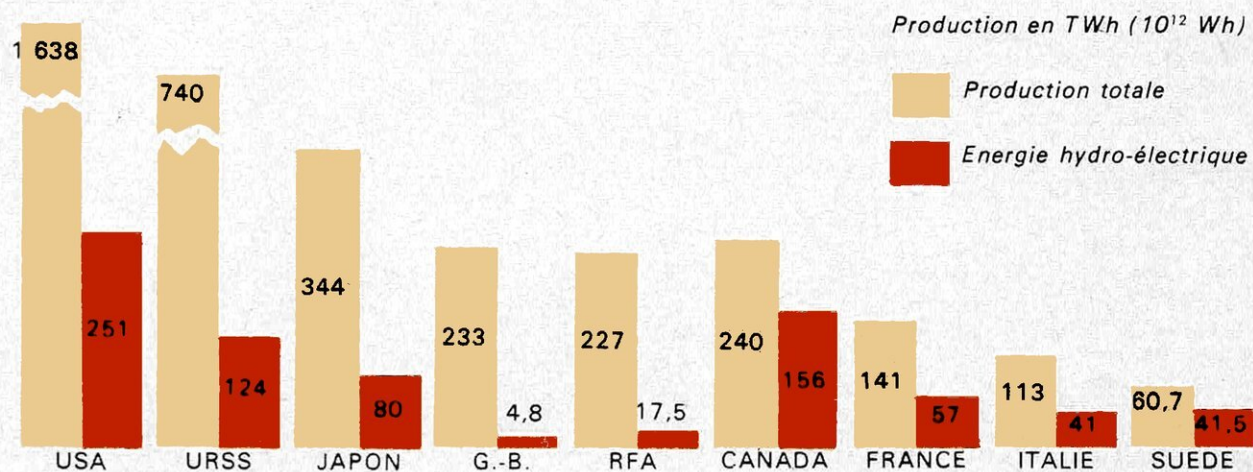
1 gigawatt-heure (1 GWh) = 10^9 Wh

1 térawatt-heure (1 TWh) = 10^{12} Wh

(1) De l'ordre de 1 000 MW.



Comment se répartit en France la production d'électricité d'origine hydraulique.



L'hydraulique dans la production d'électricité en divers pays.

LES NOUVEAUX ÉQUIPEMENTS EN FRANCE

Parmi les opérations les plus marquantes, pour la période 1974-77, on peut citer :

● **Revin (180 MW)**. Il s'agit, dans les Ardennes, d'un exemple typique de transfert d'énergie par pompage. Ce type d'aménagement utilise l'énergie bon marché des heures creuses pour pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Aux heures de pointe, cette énergie est restituée sur le réseau en la « turbinant » du bassin supérieur vers le bassin inférieur. Dans le cas de Revin, il s'agit d'un cycle quotidien de transfert d'énergie.

Située au cœur d'une région très industrialisée, Revin comporte quatre groupes réversibles de 180 MW installés dans une usine souterraine. Les trois premiers groupes ont été mis en service en 1974 et le dernier le sera en 1975. Le bassin supérieur artificiel permet de stocker sept millions de mètres cubes d'eau.

● **Gambenheim - Iffezheim (96 MW)**. Cet aménagement est réalisé sur le Rhin en coopération avec l'Allemagne. Il comprend quatre groupes-bulbes de 24 MW chacun et deux écluses de grande capacité. Le gain de productibilité sera de 600 GWh, dont 300 pour la part française.

● **La Coche (80 MW)**. La Coche, sur l'Isère, est une installation dite « mixte » avec transferts d'énergie par pompage à cycle hebdomadaire (pendant les heures creuses du week-end). L'usine souterraine est dotée de quatre groupes réversibles de 80 MW. La grande hauteur de refoulement de l'eau (916 m) nécessite l'emploi de turbines à cinq étages.

● **Arc (240 MW)**. Comme La Coche, Arc (Isère) est une opération mixte avec transfert d'énergie à cycle hebdomadaire. Elle comporte deux groupes réversibles de 240 MW, chacun d'entre eux étant installé au fond d'un puits de 55 m de profondeur.

● **Sainte-Croix et Quinson (220 MW)**. Le barrage-réservoir de Sainte-Croix, sur le Verdon, constitue la plus importante retenue réalisée après celle de Serre-Ponçon. Son volume total est proche de 770 millions de mètres-cubes. L'usine souterraine comprend un groupe de 85 MW et un groupe réversible de 54 MW. Ce dernier permet des transferts d'énergie par pompage de la retenue de Quinson vers celle de Ste-Croix. L'aménagement de Quinson, en aval de Ste-Croix, comporte un groupe de 41 MW.

● **Sisteron (118 MW)**. La chute de Sisteron représente le dernier maillon de l'aménagement de la Durance, de Serre-Ponçon à la mer. Le canal d'amenée, long de 32 km, constitue une partie importante de la retenue. L'usine souterraine comprend deux groupes de 118 MW.

● **Brommat II (226 MW)**. Cet aménagement constitue un « suréquipement » de la chute de Brommat, située sur la Truyère. Un groupe de 226 MW, installé dans l'usine souterraine, est destiné essentiellement à fournir au réseau de la puissance de pointe.



Revin : le système à deux bassins



...si permet, aux heures de pointe, une production d'électricité supérieure.

des usines abandonnées ou encore de réaliser des éclusées dans des usines au fil de l'eau (voir encadré p. 62). On peut songer enfin à l'augmentation de puissance des turbines et des alternateurs, au surremplissage de réservoirs au-delà

DE L'ÉLECTRICITÉ A PARTIR DE L'AIR COMPRIMÉ

Stockage de l'énergie (potentielle) aux heures creuses pour pouvoir la restituer aux heures de pointe est une des préoccupations majeures de l'industrie de l'électricité. Alors que les centrales thermiques sont conçues pour une production en continu, l'hydraulique se prête à cette « modulation » que réalisent déjà les installations de pompage (dont la plus importante, en France, est celle de Revin). Malheureusement, le coût élevé des installations, la difficulté de trouver des sites appropriés permettant d'étager les bassins, et les problèmes d'environnement limitent de tels programmes.

Or voici que se dessine une autre solution qu'étudient en ce moment les techniciens européens. Elle fait appel à l'air comprimé. Il s'agit d'utiliser l'énergie excédentaire des heures creuses pour comprimer une certaine quantité d'air dans une fosse souterraine : la restitution de l'énergie s'effectue par la détente de l'air dans une turbine à gaz entraînant un alternateur. Des études établies par la société suédoise Stal-Laval et menées conjointement avec l'aide du Département suédois de l'énergie, ont permis de préciser les modalités techniques et d'en chiffrer le coût.

● La pression exigée est de l'ordre de 40 kg par centimètre carré.

● Le maintien de cette haute pression est assurée par une colonne d'eau reliant la fosse à un bassin à l'air libre (l'air comprimé fait monter l'eau du bassin).

● Le coût total serait de l'ordre de 200 F par kW pour une puissance installée de 220 000 kW.

● Une usine de ce type exigerait un puits profond de 400 mètres, large de 6 mètres et débouchant dans une fosse d'une capacité de 135 000 m³.

● Le tiers environ du coût total de l'installation concernerait les travaux de creusement, les deux autres tiers couvrant le matériel de production proprement dit.

La société Stal-Laval fait observer qu'elle n'attend plus que le « feu vert ». Turbines, générateurs, compresseurs sont d'ores et déjà réalisés.

En France, les techniciens d'EDF étudient également un projet de ce type qui pourrait voir le jour en Bretagne. Les experts français sont d'accord avec leurs confrères suédois pour estimer que le coût d'une installation à air comprimé serait moins élevé que celui d'une opération de stockage par pompage.

de la cote de retenue normale, à des installations de pompage...

Parmi les installations de groupes supplémentaires, la plus marquante serait celle de Pragnères, dans les Hautes-Pyrénées, avec l'implantation d'un 3^e groupe d'une puissance de 60 MW.

Du côté des remises en marche, au moins provisoires, citons l'usine du Tech, dans les Pyrénées-Orientales, arrêtée depuis plus de 10 ans.

On peut réaliser un « grignotage », finalement non négligeable, en s'attaquant au détail des usines hydrauliques. En retaillant les aubes des turbines, ou en modifiant les pales (selon les types de turbines), les augmentations de puissance escomptées sont de l'ordre de 5 à 7 %.

Le surremplissage des réservoirs consiste à utiliser à la production électrique la tranche de volume comprise entre la cote de retenue normale et la cote des plus hautes eaux, celle pour laquelle le barrage a été calculé. On reste ainsi dans les limites de sécurité.

Un autre type d'action peut être illustré par l'usine de Bollène, dont la Compagnie nationale du Rhône est concessionnaire. Elle est la première qui ait été construite sur le Bas-Rhône, formant aujourd'hui un goulot d'étranglement en raison d'un débit inférieur à celui des usines encadrantes. Dans les meilleures hypothèses, on pense pouvoir augmenter sa puissance de 50 MW.

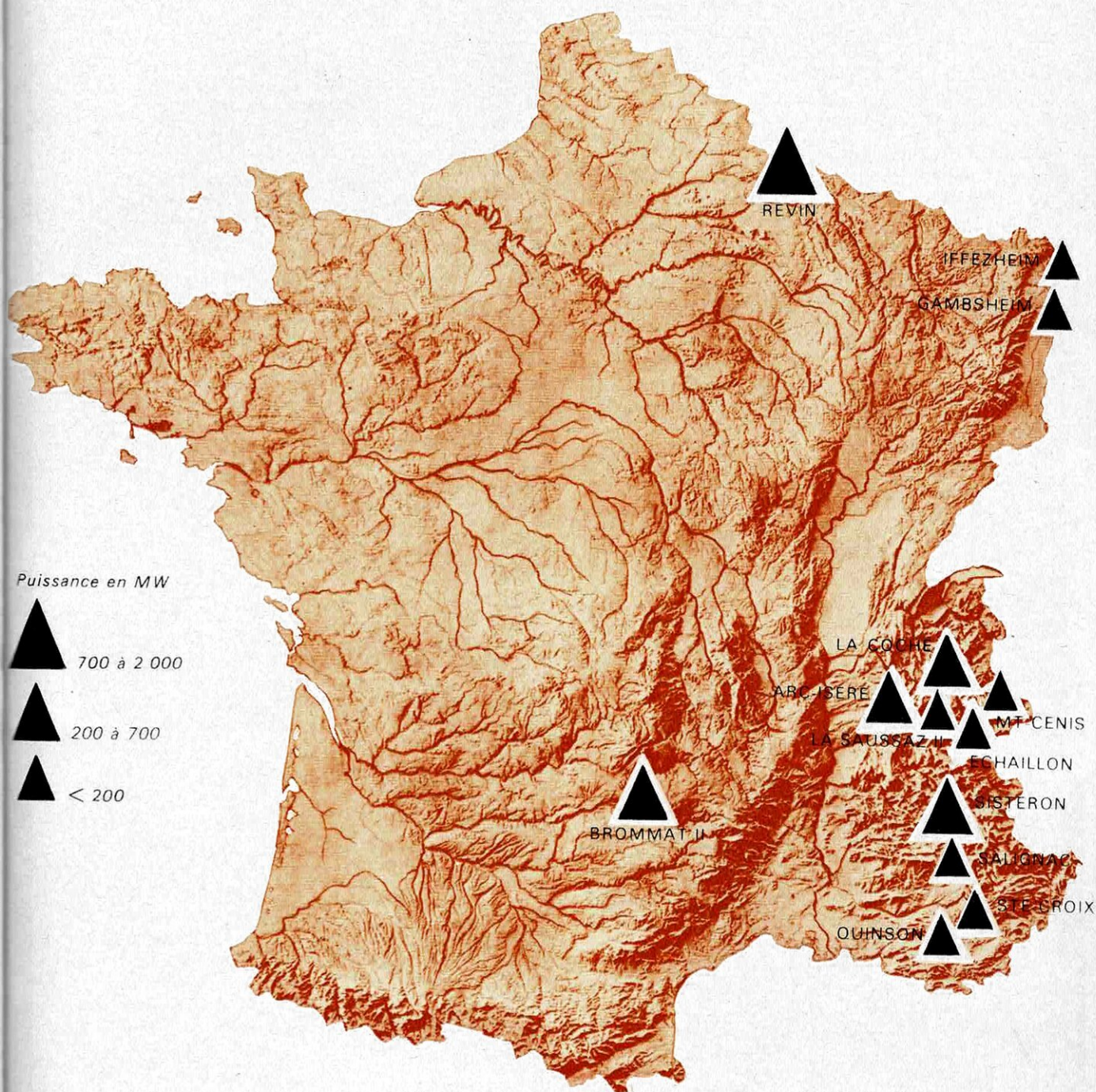
Dans les aménagements où l'on dispose de deux réservoirs à des altitudes différentes, on peut les relier par une station de pompage. Les apports de la basse chute ne sont plus turbinés directement, mais pompés, aux heures creuses des fins de semaine, du réservoir inférieur dans le réservoir supérieur, pour être turbinés, en heures pleines, sur la haute chute. Une telle exploitation est possible par exemple à L'Hospitalet, dans la haute vallée de l'Ariège.

Certains experts estiment, cependant, que le développement de la technique de pompage ne sera vraiment défini qu'après 1980 en raison des incertitudes actuelles sur les besoins d'énergie de pointe dans les années à venir. Il est cependant probable que ces types d'aménagement se développeront après 1985.

On va jusqu'à envisager des gains de production par le biais des revêtements très lisses, à base de polyuréthanes, utilisables dans les conduites forcées où elles diminuent les pertes de charge. Un gain de 1 % de la chute à la puissance maximum entraînerait une augmentation de production de l'ordre de 0,7 %. Le total des gains serait pour les quatre centrales où une telle solution est envisagée, de 7 MW en puissance garantie et de 10 MW en puissance de pointe.

Un avenir tout de même ?

Ainsi, par des solutions pouvant paraître peu « élégantes », et en limitant nos exemples au cadre français, on a pu trouver des moyens d'accroître, pendant les années et surtout les hivers 1977 à 1980, les performances du parc hydro-



Les nouveaux équipements en cours ou en projet à la fin 73.

lique de quantités qui sont intéressantes, puisqu'elles atteignent environ 600 MW en puissance. A noter, d'ailleurs, qu'une partie de ces suppléments demeurera acquise définitivement.

Il n'est pas possible de chiffrer avec une parfaite exactitude le coût des actions qui seront effectivement réalisées puisque la sélection entre toutes celles qui sont envisagées reste à faire. Une estimation prudente conduit à retenir, pour

les investissements, le chiffre de 180 millions de francs (base juin 1974). Voilà une somme relativement peu importante, à rapprocher du coût de construction d'une seule « tranche » de nucléaire. Et on sait, d'ailleurs, les difficultés, liées aux contraintes de refroidissement, qui se posent en de nombreux endroits pour l'implantation du nucléaire.

Pour les plus importantes de ces opérations

dont le coût d'investissement en francs 1974 est voisin de 0,70 F/kWh annuel pour une utilisation de la puissance garantie de 2 500 à 3 000 heures, la rentabilité est très comparable à celle qui s'attache à la réalisation, à la même époque, d'une ou de deux tranches thermiques classiques de 700 MW à Cordemais. Par contre, la rentabilité de ces opérations serait gravement compromise si la mise en service se trouvait repoussée au-delà de 1979.

Tous les experts, d'ailleurs, ne sont pas forcément du même avis sur l'avenir de l'hydraulique. L'ingénieur EDF Bordet, par exemple, estime que la nécessité contraindra la France à aménager de plus en plus ses ressources en eau. Pour lui, les sites qui n'étaient pas rentables pour la production d'électricité le deviendront à coup sûr pour les autres utilisations de l'eau (besoins agricoles, urbains, industriels, touristiques). Qui sait, alors, du moins est-ce notre opinion, si l'électricité ne pourrait pas devenir un sous-produit, non négligeable pour les besoins locaux, de tels aménagements.

C. Bordet remarque, dans un document récent : « ...nous pouvons jeter un regard sur certains de nos voisins. Je pense en particulier à l'Espagne où s'est tenu, il y a un an, le dernier Congrès international des grands barrages. Ce pays, moins industrialisé que le nôtre, a construit plus de 600 grands barrages, plus du double de nous, et un nouveau barrage est mis en service tous les deux mois. A voir cela, penserons-nous qu'il est inutile, sinon impossible, « d'aménager » l'eau en France ? »

Luc FELLOTT

60%. DE «L'HYDRAULIQUE»... AU FIL DE L'EAU

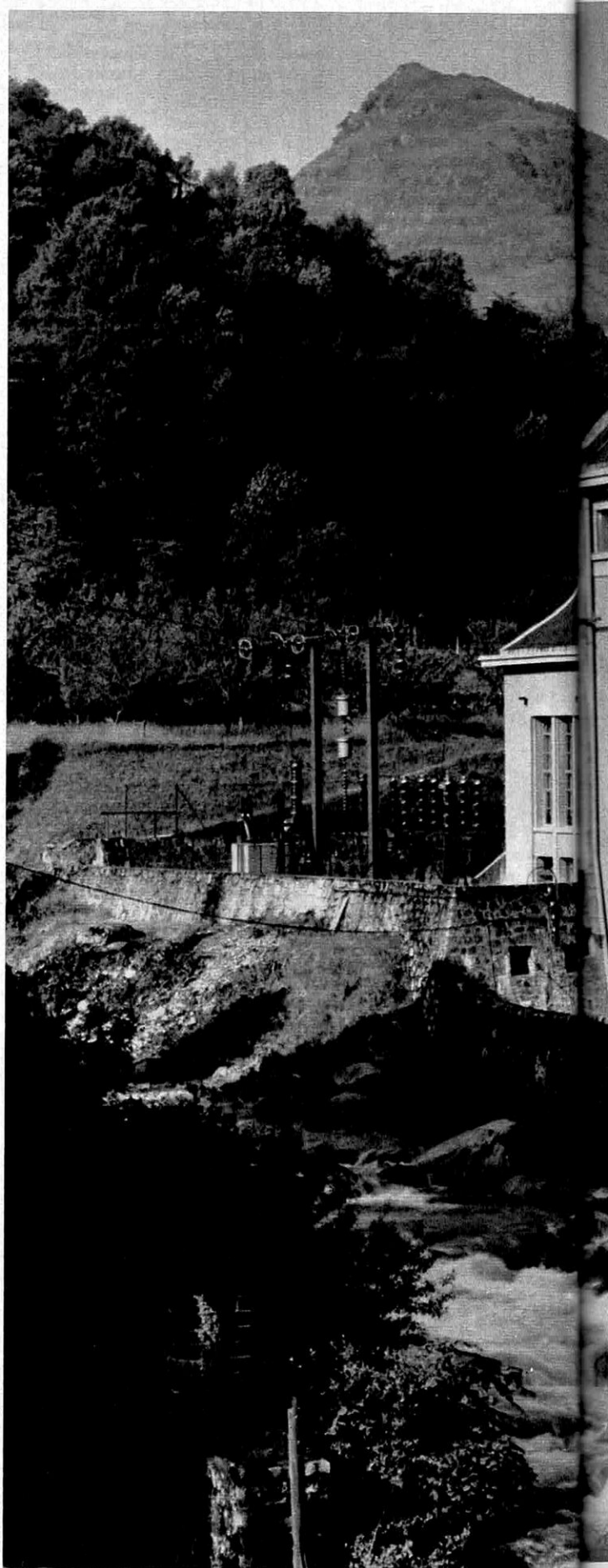
Les usines hydrauliques sont, en France, classées en trois catégories d'après leur manière d'exploiter les apports. Cette classification est basée sur le temps de remplissage du réservoir propre à l'usine.

Les usines fil de l'eau ont un réservoir à temps de remplissage de 2 heures au plus. On ne peut guère différer l'emploi des apports et ces usines utilisent normalement le débit tel qu'il se présente.

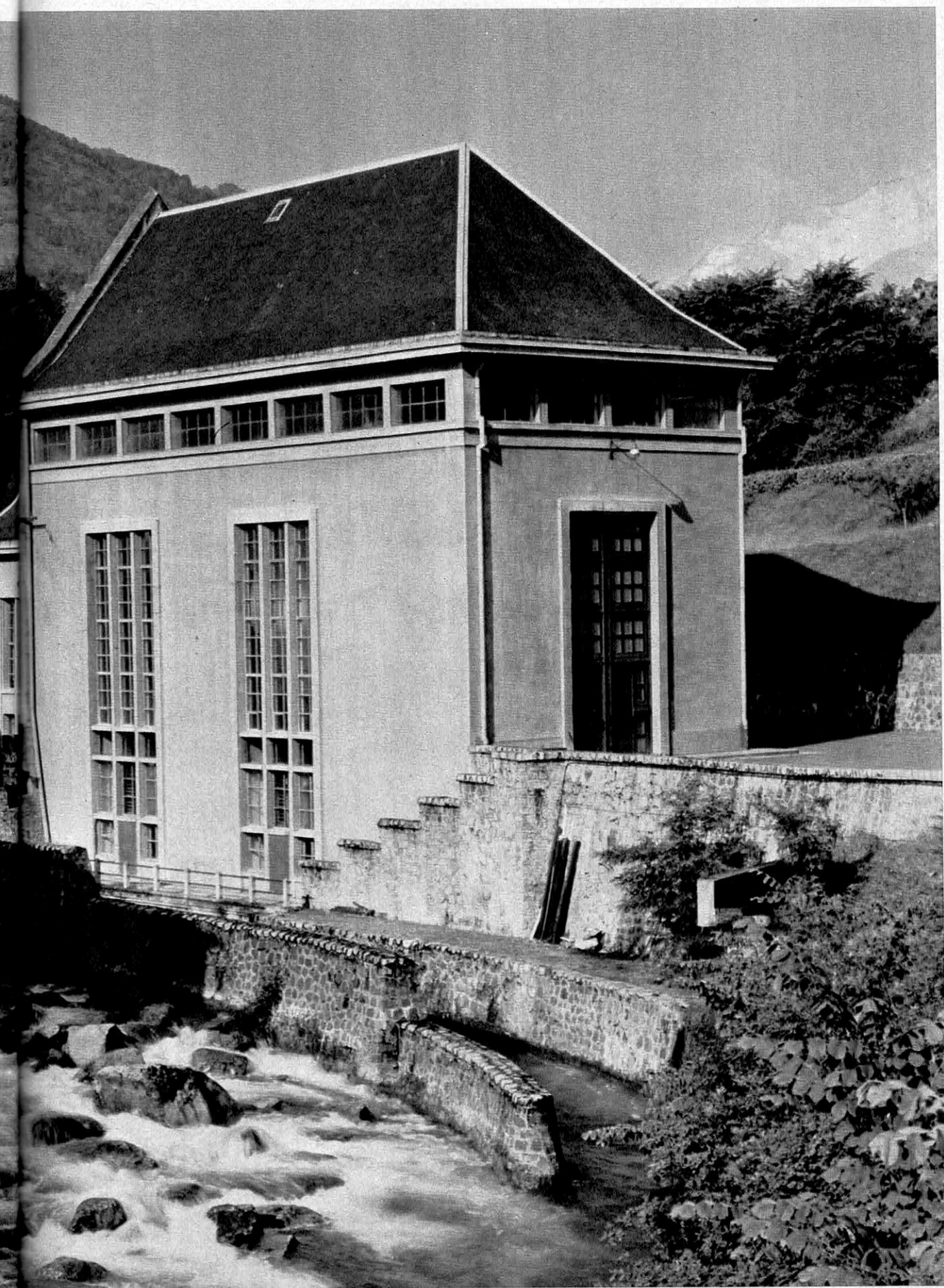
Les usines éclusées ont un réservoir à temps de remplissage de 2 à 400 heures. Elles peuvent en particulier stocker de l'eau pendant la nuit pour la « turbiner » le jour, aux heures de pointe.

Pour les usines lacs, le temps de remplissage du réservoir est d'au moins 400 heures, d'où une régulation à plus long terme de la production.

Les parts respectives moyennes dans la production française d'électricité sont de 62 % pour le fil de l'eau, 20 % pour les éclusées et 18 % pour les lacs.



Les grands barrages ne sont pas seuls à prendre en co



UN NOUVEAU DÉPART POUR LE CHARBON ?

*Le charbon coûte cher
à extraire et tous les gisements
connus ne sont pas
forcément exploitables
dans de bonnes
conditions économiques.*

*La flambée des prix
du pétrole n'en a pas moins fait
reculer les limites
à l'intérieur*

*desquelles extraire le charbon
devenait intéressant.*

*La France elle-même a donné
un coup de frein,*

*en 1974, au plan de récession
des houillères. Néanmoins,*

*la Grande-Bretagne,
l'Allemagne, les pays de l'Est*

*ou les USA sont beaucoup
mieux dotés que nous*

*par la nature du point de vue
des gisements rentables.*

Gilbert Friedrich.





● L'ère industrielle est née du charbon. Et pendant plus d'un siècle, il a constitué la principale source d'énergie des nations industrialisées. La consommation charbonnière restait l'étalon type pour mesurer le développement d'un pays. Vers 1870, la production mondiale était déjà de 150 millions de tonnes, dont 100 millions pour le seul Royaume-Uni. En 1900, elle atteignait 700 millions de tonnes, 1 milliard 200 millions en 1913, 1 milliard 800 millions en 1958.

Pourtant, dès la fin de la seconde guerre mondiale, le pétrole et le gaz naturel avaient commencé à jouer un rôle important dans la production énergétique. Ils s'imposèrent, finalement, dans les années 60. En 1962, la production du pétrole et du gaz naturel dépassait celle du charbon. En 1973, elle en représentait plus du double !

Le pétrole coulait à flot, bon marché, et les réserves semblaient inépuisables. Et puis, de toutes façons, il ne s'agissait que d'attendre l'avènement de l'énergie nucléaire qui serait bientôt prête à prendre la relève. Les autres sources d'énergie furent peu à peu délaissées.

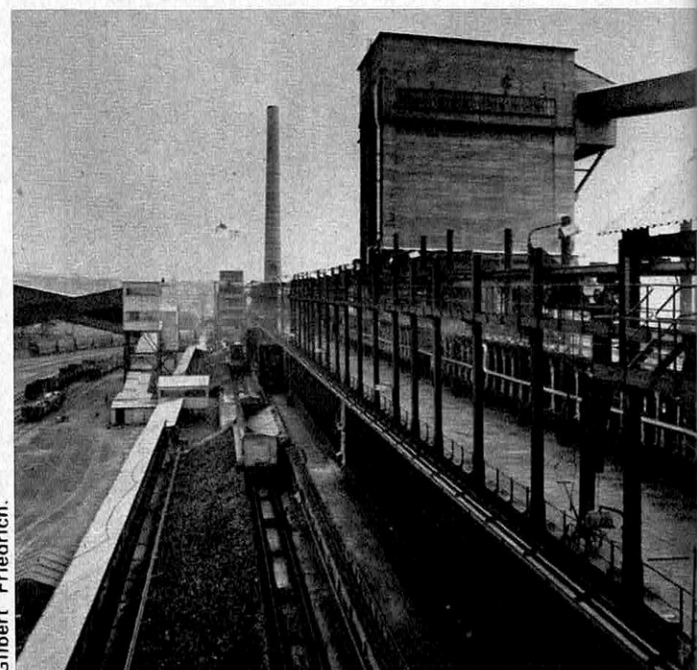
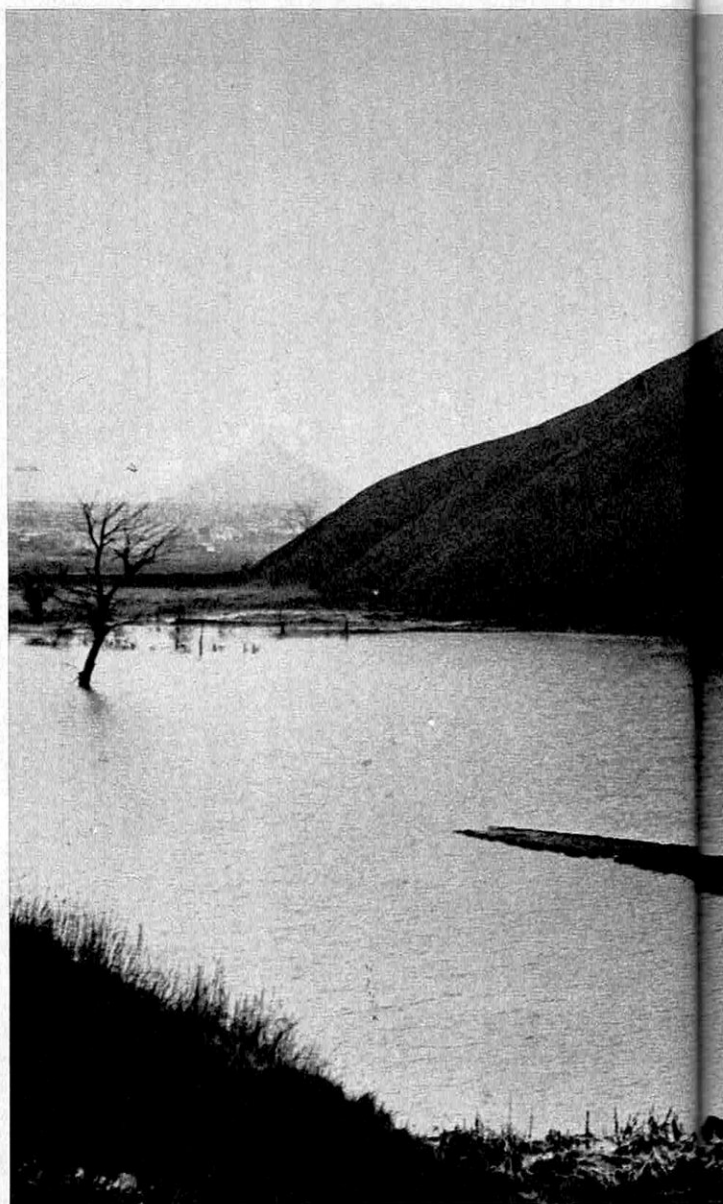
En fait, la consommation mondiale de charbon continue à progresser légèrement grâce, surtout, à la nette augmentation de production de l'U.R.S.S. et de la Chine. Mais en Europe occidentale, donc dans les plus vieux pays producteurs, la récession est rapide.

Alors qu'il produisait près de 300 millions de tonnes en 1913, le Royaume-Uni retombait à 165 millions en 1967, le niveau de 1885 ! La production de la Belgique passait de 30 millions de tonnes en 1952 à 10 millions en 1972. Celle de la République fédérale allemande de 151 millions en 1956 à 102 millions en 1972. Celle de la France de 60 millions de tonnes en 1958 à 28 millions en 1973. Le même phénomène s'est produit au Japon.

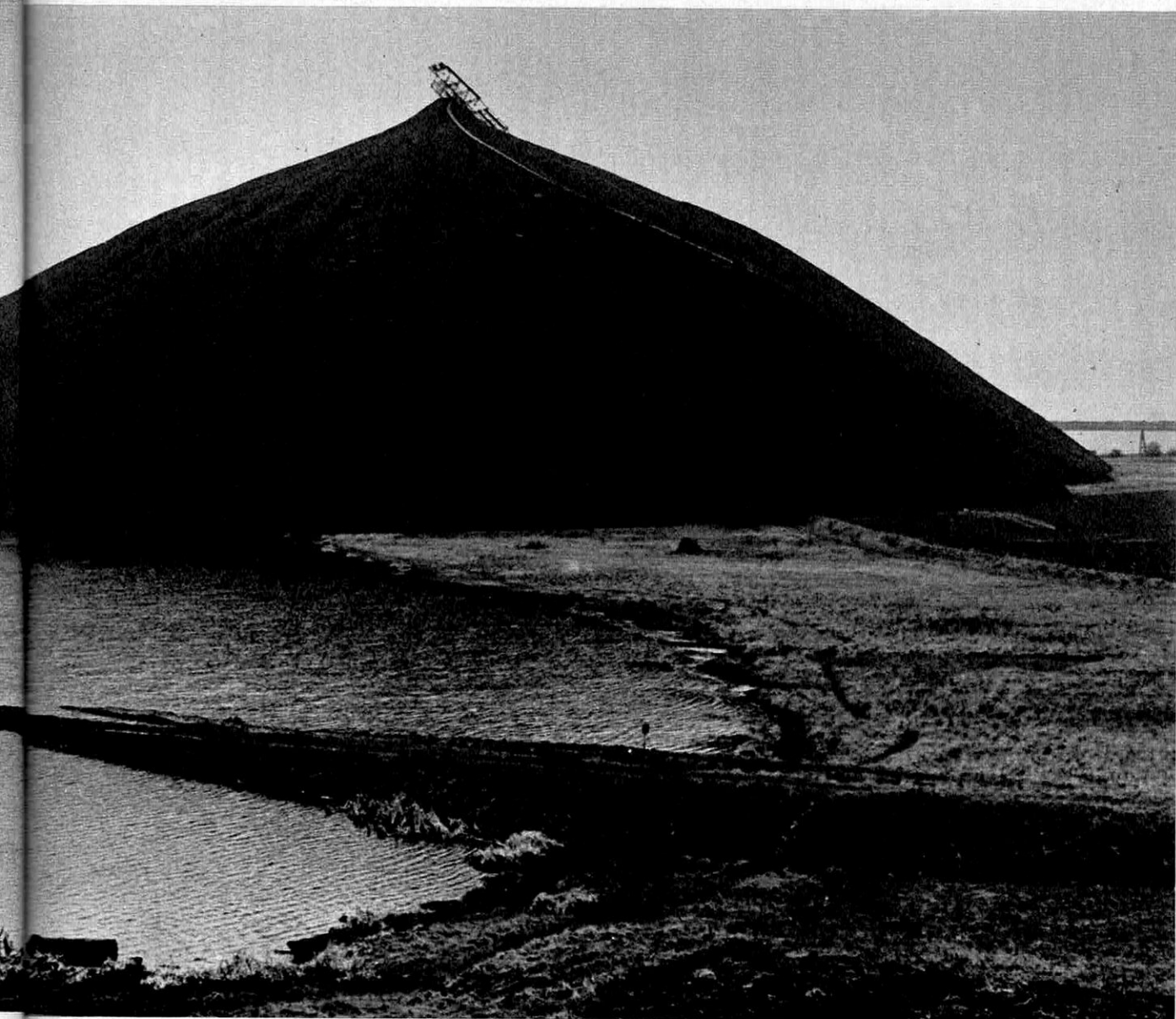
Pour ces pays, l'ère du charbon semblait définitivement révolue et on pouvait penser que les U.S.A., favorisés par des gisements plus facilement exploitables, maintiendraient encore quelques temps leur production, un peu plus de 500 millions de tonnes ces dernières années, puis suivraient la même voie.

Actuellement, le charbon ne représente plus

En 1958, la production française de houille frôlait les 60 millions de tonnes. En 1974, elle a à peine atteint 25 millions de tonnes. Dans l'intervalle, un vaste plan de ralentissement de la production avait été mis en place. Il était lié au faible prix des produits pétroliers, aux espoirs suscités par le nucléaire et aux difficultés d'exploitation du charbon sur le territoire national dans des conditions économiques intéressantes. Cette politique s'est traduite par la fermeture, par l'abandon, de nombreuses mines (photo en haut) et était généralement combattue par les syndicats. Ces derniers ont pris prétexte de la crise de l'énergie pour réclamer une relance de la production. Celle-ci ne sera en fait que légèrement accrue, mais on a prévu la recherche de nouveaux gisements.



Gilbert Friedrich.



Jean Marquis.



J.-P. Paireault - Magnum.

que 25 % de la production mondiale d'énergie primaire, 17 % pour la France et 15 % seulement pour les U.S.A.

Et puis, brusquement, vers la fin 73, la crise éclate et les prix du pétrole quadruplent en quelques mois. En même temps, on commence à se rendre compte que les réserves ne sont pas si importantes qu'on voulait bien le croire. Mêmes inquiétudes pour le gaz naturel ! Hâtivement, on définit des politiques du « tout nucléaire ».

Hélas, face aux gigantesques programmes de construction de centrales atomiques, les obstacles se dressent nombreux : difficultés techniques, protestations « écologiques », coût incertain... Bien plus, même en commençant dès aujourd'hui la réalisation d'un tel programme, l'atome ne pourrait encore satisfaire que 40 % au plus des besoins mondiaux d'énergie à la fin de ce siècle. Il reste donc 60 % à trouver et, au taux actuel de croissance, cela représente beaucoup plus que la production totale actuelle.

Retour aux sources

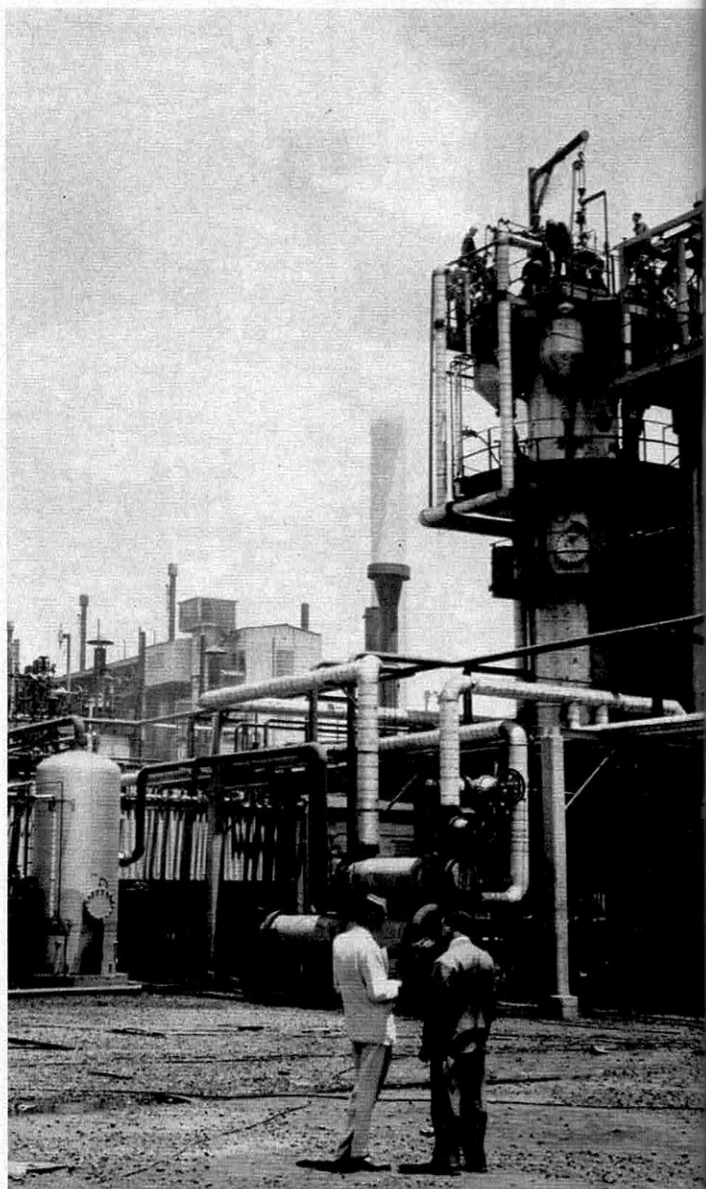
Après avoir fait l'inventaire de toutes les énergies nouvelles possibles, on s'est naturellement tourné vers celle du passé : le charbon. Revirement spectaculaire ! Ainsi, le président Nixon, dans son second message au Congrès sur l'énergie, en avril 1974, demandait « que la plus grande priorité soit donnée au développement et à l'utilisation accrue des ressources en charbon des U.S.A. ». Deux ans auparavant, dans un premier message, c'est la mise au point d'un réacteur à neutrons rapides qui passait au premier plan.

En 1974, le gouvernement américain a décidé d'augmenter de 1,5 milliard de dollars le crédit initial de 800 millions destiné aux recherches sur le charbon pendant les cinq années à venir.

En France même, le gouvernement annonçait en mars 1974 une révision du Plan charbonnier de 1968, le Plan Bettencourt, qui prévoyait une réduction progressive de la production. On demande maintenant aux Charbonnages de freiner le rythme de la récession, de façon à conserver en 1980 un niveau de production de l'ordre de 21 millions de tonnes, au lieu des 12 millions prévus.

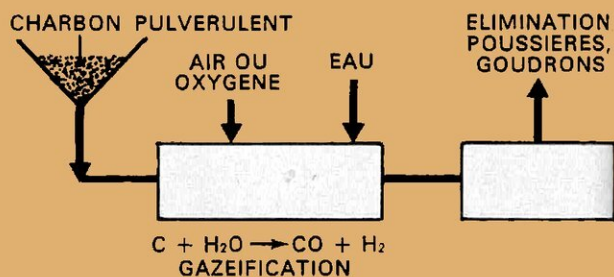
Pourquoi le charbon ? Tout simplement parce, que, contrairement aux hydrocarbures, les réserves en sont considérables.

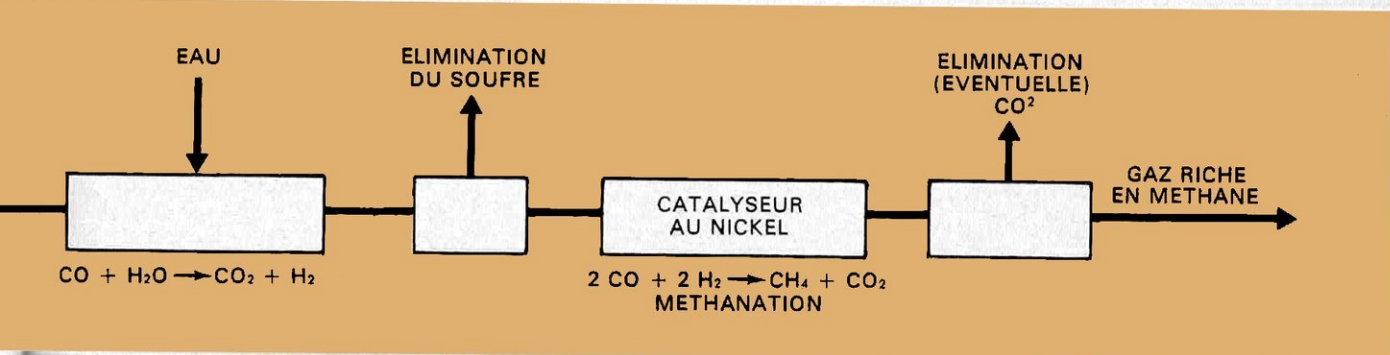
Alors que, depuis le début de son exploitation, on a extrait 130 milliards de tonnes de charbon, les réserves actuelles sont estimées à 8 000 milliards de tonnes ! La consommation mondiale d'énergie de toute origine étant environ de 8 milliards de T.E.C. (tonnes d'équivalent charbon), le charbon suffirait donc ainsi à couvrir 1 000 ans de besoins énergétiques, si ceux-ci n'augmentaient pas. Bien sûr, au rythme actuel de croissance, l'échéance serait beaucoup plus courte, 150 ans d'après le Club de Rome, mais permettrait néanmoins d'attendre la mise au point de nouvelles solutions.



South African Information Service.

Les nouvelles chances du charbon sont associées à la possibilité d'en tirer des combustibles modernes, liquides ou gazeux. En bas de page, un schéma très général de la méthanation de la houille. Divers procédés sont expérimentés aux USA, par exemple dans cette usine (page de droite) financée par l'Office of Coal Research. Quant à l'Afrique du Sud, elle produit depuis vingt ans de l'essence à partir du charbon dans ses usines (ci-dessus) de Sasolburg, actuellement en pleine expansion.





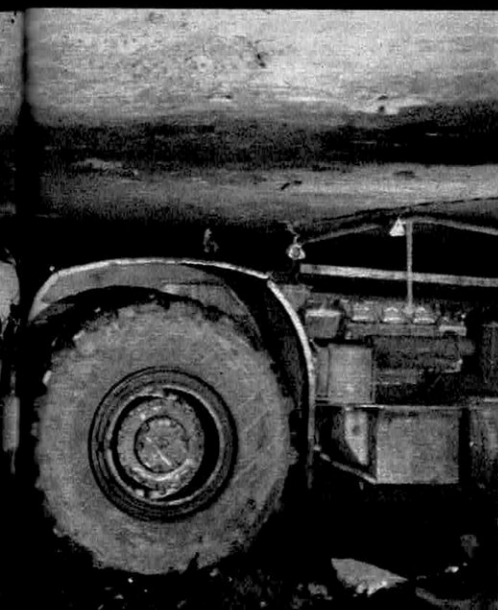


Conséquence de la crise de l'énergie, la consommation de charbon doit, en France, pendant plusieurs années, ne plu d





plu décroître. Mais cette décision ne signifie pas que la production des houillères nationales soit beaucoup accrue.



Où se trouvent ces fantastiques réserves ? En fait, elles sont bien inégalement partagées puisque trois pays en détiennent au moins 90 %. L'U.R.S.S. venant en tête avec 4 300 milliards de tonnes, soit plus de la moitié du total, les U.S.A. avec 1 500 milliards et la Chine avec de 600 à 1 000 milliards.

Ces pays qui sont déjà les trois premiers producteurs, avec respectivement 23 %, 22 % et 16 % de la production mondiale, ne risquent donc pas de se voir détrônés. L'Europe est beaucoup moins favorisée, bien que l'Allemagne, la Pologne, la Grande-Bretagne et la Tchécoslovaquie disposent de réserves qui sont loin d'être négligeables. Pour la France on ne peut guère espérer plus de 1 milliard et demi de tonnes.

Il convient tout de même d'accepter ces chiffres avec les plus grandes précautions. D'une part il ne s'agit que d'estimations ; d'autre part il faut tenir compte des conditions dans lesquelles elles sont faites. Les données en question, avancées par l'US Geological survey, concernent les réserves récupérables, estimées à 50 % du charbon effectivement en terre, dans des couches d'au moins 35 cm d'épaisseur, à des profondeurs inférieures en général à 1 200 m. Il reste ensuite à vérifier.

Ainsi, la Conférence mondiale de l'énergie, en 1962, estimait à 7 500 milliards de tonnes les réserves totales, mais reconnaissait que les réserves réellement prouvées n'étaient seulement que de 600 milliards. M. Paul Gardent, directeur général des charbonnages de France précisait, lors du colloque sur l'Energie qui s'est tenu à Paris en décembre 1973 : *« La notion de réserves charbonnières, comme d'ailleurs de réserves minières en général, est une notion très aléatoire. Aux aléas proprement géologiques qui sont grands, car certains gisements sont en fait à peine reconnus, s'ajoutent des aléas techniques, à savoir ce qui est récupérable dans un certain état de la technique, et des aléas économiques, ce qui est récupérable à un prix de revient déterminé dans un contexte du marché... »*

Ainsi les réserves « économiquement exploitables » n'étaient estimées en 1962 qu'à 300 milliards de tonnes à une époque où les prix de l'énergie étaient très bas. Aujourd'hui, la flambée des prix a dû considérablement repousser la limite. Si l'on permet au coût de production de doubler, le volume des réserves économiquement exploitables est multiplié par 15 !

Une solution non universelle

Quelle que soit l'évolution des prix de l'énergie, le charbon ne saurait en aucun cas retrouver une place importante en France. Non seulement parce que les réserves sont insuffisantes, mais aussi et surtout parce que le rendement de leur exploitation est faible.

Trop souvent, le charbon est de qualité médiocre, les couches irrégulières ou d'épaisseur insuffisante pour l'exploitation (on admet actuelle-

ment qu'une couche inférieure à 80 cm n'est pas exploitable). En dépit d'un effort considérable entrepris depuis la dernière guerre par les Charbonnages de France pour moderniser le matériel, la production par homme et par jour atteint tout juste 4 tonnes. C'est bien peu comparé aux 12 tonnes du mineur américain (encore ce rendement était-il de 16,5 tonnes il y a quelques années, avant que le tout puissant syndicat des mineurs n'impose une amélioration des conditions de travail et des normes de sécurité).

Quant aux mines à ciel ouvert, leur rendement atteint 30 ou même 40 tonnes aux Etats-Unis. C'est bien entendu sur celles-ci que les U.S.A. devront compter s'ils veulent doubler leur production d'ici 1980 et franchir le cap du milliard de tonnes par an, comme ils l'ont récemment annoncé.

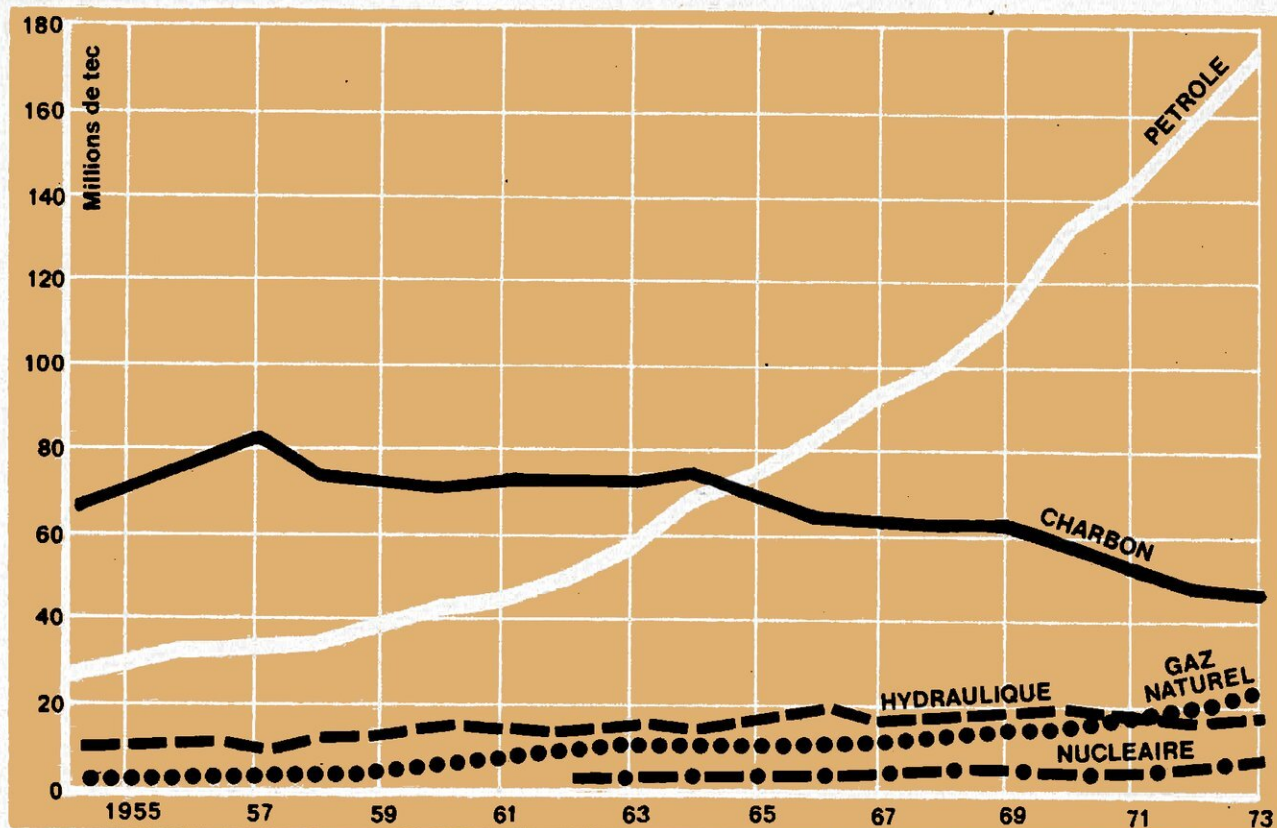
Plus aisée et plus rentable puisque permettant l'emploi d'énormes engins, l'exploitation à ciel ouvert pose un nouveau problème : la dévastation des sites. Une des plus grosses machines, « Big Muskie » peut extraire 200 mètres cubes de roches à la fois, soit 4 millions de mètres cubes par mois ! De tels monstres laissent derrière eux des cratères profonds de plusieurs dizaines de mètres, sur des dizaines de kilomètres carrés.

Pour extraire 1 milliard de tonnes par an de cette manière, il faudrait saccager d'ici 1980 une superficie égale à celle du Connecticut (13 000 km²). Les conséquences peuvent être graves : rupture de l'équilibre hydrologique et pollution acide des eaux.

Seul remède : la restauration des sites après exploitation. Mais, d'une part, cela revient fort cher (augmentation de 30 à 50 % des coûts de production) ; d'autre part, la végétation a beaucoup de mal à revivre sur de tels sols. Des compagnies minières américaines font actuellement des essais avec diverses variétés de végétaux pour trouver les plus efficaces. Mais, d'après la National Academy of Sciences, il serait de toutes façons nécessaire que les précipitations dépassent 300 mm par an, ce qui n'est pas le cas de certains états de l'Ouest promis à l'avenir charbonnier, tels l'Arizona ou le Nouveau Mexique.

Le charbon ne pose d'ailleurs pas que des problèmes d'extraction. Sa combustion peut faire peser de graves menaces sur l'environnement. D'une part, parce qu'il contient du soufre (jusqu'à 8 %), d'autre part, parce qu'il laisse une grosse quantité de cendres (souvent plus de 10 % et parfois jusqu'à 40 %). Lors de la combustion, une partie du soufre se mêle aux poussières des fumées (ce qui donnait sa teinte jaunâtre au « smog » londonien). La majeure partie est oxydée en anhydride sulfureux, d'une grande toxicité. Une centrale thermique de 1 000 MW brûlant un charbon contenant 10 % de cendre et 4 % de soufre rejetterait ainsi toutes les heures plus de 30 tonnes de poussières et près de 30 tonnes de SO₂ (1).

Ces taux étant inadmissibles, il est nécessaire d'envisager des traitements dépolluants. Ainsi



La part prise par le pétrole dans l'économie française explique bien les difficultés actuelles.

aux Etats-Unis, le Clean Air Act de 1970 a réglementé de façon très stricte les rejets de poussières et de SO₂ dans l'atmosphère. Cette loi devrait prendre effet en 1975, mais les difficultés techniques et économiques repousseront sans doute son application de quelques années.

Un premier procédé consiste à éliminer le soufre du charbon par dissolution, mais le procédé est coûteux et ne résout pas le problème des cendres volantes. Il est donc préférable de traiter les fumées. Les particules solides sont retenues par filtrage et le SO₂ extrait par voie chimique. De nombreux systèmes sont à l'étude mais on attend encore leur application industrielle.

Le nouveau gaz de charbon

Face à ces problèmes et pour satisfaire une industrie à présent adaptée à l'utilisation des hydrocarbures, il semble que le renouvellement du charbon ne puisse passer que par sa gazéification ou sa liquéfaction. Puisque gaz naturel et pétrole vont manquer, le plus simple serait de les remplacer par des produits analogues tirés du charbon.

Dès la fin du XVIII^e siècle, on savait obtenir un gaz combustible en chauffant du charbon. Une partie du charbon était brûlée à l'air libre pour fournir la chaleur à l'autre partie, enfermée dans un récipient en présence d'air et de vapeur

d'eau. C'est le procédé du « gaz à l'eau » dont la réaction est bien connue : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$. Le gaz obtenu est un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. En 1812 une compagnie londonienne distribuait déjà ce gaz destiné à l'éclairage.

Pendant près d'un siècle et demi, le même procédé nous fournit le « gaz de ville » récemment remplacé peu à peu par le gaz naturel, composé principalement de méthane, au pouvoir calorifique triple.

Deux versions améliorées de cette méthode ont abouti à des réalisations industrielles. La première fut mise au point en 1936 par Lurgi Gesellschaft Mineralöltechnik à Francfort et est employée actuellement dans une soixantaine d'usines. L'autre, le procédé Koppers-Totzek, date de 1949. Aujourd'hui les 53 gazogènes Koppers-Totzek existants produisent chacun 50 000 m³/h.

Dans le procédé Lurgi, le charbon brûle dans l'air sous une pression de 30 bars, alors que le procédé Koppers-Totzek utilise l'oxygène à la pression atmosphérique. Dans les deux cas, le gaz obtenu ne peut constituer un substitut du gaz naturel puisque sa valeur calorifique est beaucoup trop faible (2,6 thermies/m³ contre 9 thermies/m³). D'autre part, la présence d'oxyde de carbone rend ce gaz dangereux et a provoqué certaines limitations à son emploi.

On peut cependant améliorer le procédé en y ajoutant un étage de « méthanation » par catalyse au nickel. Assez coûteuse, cette méthode per-

(1) « Total Informations », n° 57.

met d'obtenir un gaz comparable au gaz naturel et qui pourrait donc être distribué par le même réseau. Une usine de ce type est en cours d'achèvement en Ecosse. Destinée à produire 100 000 m³ par jour d'un gaz proche de celui de la mer du Nord, elle a été financée par un consortium de compagnies américaines qui y ont investi 6 millions de dollars.

D'ailleurs, aux U.S.A., la société El Paso est en train de construire une usine analogue qui devrait produire 8 millions de mètres cubes par jour en 1976. Cette gigantesque réalisation coûtera quelque 300 millions de dollars. Ses trente gazomètres Lurgi y traiteront environ 8 millions de tonnes de charbon par an (plus du quart de la production française !) provenant d'une mine à ciel ouvert du Nouveau-Mexique.

On recherche actuellement des procédés dont le coût serait moins élevé.

Actuellement, quarante nouvelles méthodes de gazéification plus ou moins dérivées de ces systèmes sont à l'étude aux Etats-Unis suivant deux voies : l'obtention soit d'un gaz à fort pouvoir calorifique remplaçant le gaz naturel ; soit d'un gaz à faible pouvoir calorifique qui, meilleur marché, mais difficilement transportable, devrait être utilisé dans des centrales électriques proches des mines. Ces projets sont le fait d'organismes publics comme le Bureau of Mines, ou d'instituts de recherche comme l'Institute of gas technology, mais aussi de sociétés privées et notamment des grands groupes pétroliers comme Continental Oil ou Exxon.

A l'heure actuelle, quatre méthodes sont parvenues au stade expérimental en usines-pilotes. Les procédés « Bi-Gas » de Bituminous Coal Research ; « Synthane » (120 tonnes de charbon traitées par jour), de l'US Bureau of Mines (70 tonnes) ; « Hygas » de l'Institute of Gas Technology (75 tonnes) ; « CO₂ Acceptor » de Consolidation Coal Co (40 tonnes).

Toutes produisent un « gaz naturel synthétique » débarrassé de ses impuretés, notamment du soufre.

Une voie toute différente consiste à gazéifier le charbon « in situ », c'est-à-dire dans le gisement lui-même. Le principe est simple : il suffit de creuser deux puits assez rapprochés. Par l'un, on injecte un courant d'air qui entretient la combustion du charbon et se charge des gaz produits, un mélange de CO et CO₂. Par réaction sur le charbon à haute température, le CO₂ peut être réduit en CO. Le gaz récupéré par l'autre orifice est alors utilisable.

Le procédé est employé en U.R.S.S. et les Américains tentent actuellement de le maîtriser. Mais les difficultés sont nombreuses. Il faut que la couche de charbon soit suffisamment perméable pour laisser circuler le courant gazeux. Et le gaz obtenu a un pouvoir calorifique fort variable. Enfin on risque de provoquer une contamination des eaux souterraines. L'intérêt majeur de ce procédé est qu'il permet d'utiliser des gisements qui ne se prêtent pas ou mal à l'extraction classique.

Liquéfier la houille et le lignite

Moins nombreux sont les projets de liquéfaction du charbon. L'idée est pourtant ancienne. Dès 1913, l'allemand Friedrich Bergius mettait au point une méthode pour transformer le charbon en un liquide comparable au pétrole brut. Les recherches se poursuivirent en Allemagne, pauvre en pétrole ; en 1926, les chimistes Franz Fischer et Hans Tropsch définissaient le procédé qui porte leur nom et qui fut utilisé pendant la dernière guerre mondiale pour fabriquer de l'essence synthétique.

Il s'agit dans un premier temps de produire du gaz à l'eau à partir du charbon, puis de faire passer ce gaz à très haute température à travers un catalyseur approprié pour obtenir des hydrocarbures. Actuellement, seule dans le monde, la « South African Coal, Oil and Gas Corporation Ltd » produit de l'essence par ce procédé. Les voitures sud-africaines roulent donc à « l'essence de charbon ». De quoi faire rêver les américains !

Ailleurs, différentes sociétés commencent à s'intéresser à la liquéfaction du charbon. Ainsi E.B. Walker, vice-président de la Gulf Oil, annonçait à la fin de 1973 que sa compagnie venait de mettre au point un nouveau procédé, et en profitait pour déclarer : « *il semble que des produits liquides extraits du charbon puissent concurrencer favorablement le pétrole de l'Arctique nord américain, ainsi que des régions côtières d'Amérique du Nord qui n'ont pas encore été explorées* ».

Dans leur titanique recherche de sources d'énergie, les pays occidentaux devraient également redécouvrir le lignite, certes moins riche en énergie que la houille, mais dont d'énormes réserves existent également. Actuellement, 80 % de la production mondiale est assurée par les pays socialistes. A elles seules, la République démocratique allemande (avec 32 %) et l'U.R.S.S. (avec 20 %) en produisent plus de la moitié.

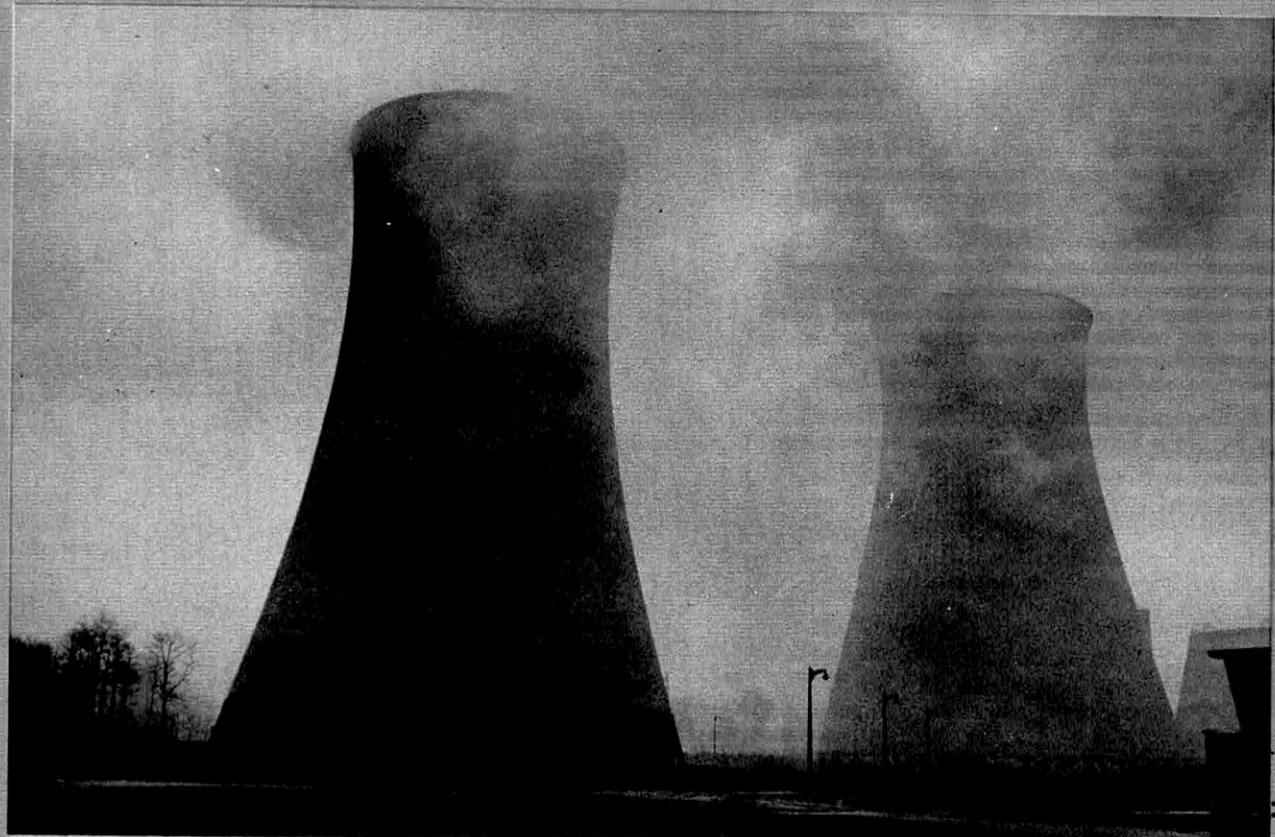
Pourtant, les U.S.A. commencent également à s'y intéresser. Avec 450 milliards de tonnes de réserves, le lignite pourrait jouer un rôle non négligeable dans leur économie alors qu'il ne représentait jusqu'à présent qu'à peine 1 % de leur production de combustibles solides. Déjà, deux centrales américaines produisent de l'électricité à partir du lignite ; quatre autres sont en construction. Il est prévu qu'en 1977, le lignite fournira presque 3 000 MW.

Comme pour la houille, on pense aussi à la gazéification, et une usine-pilote fonctionne à Rapid City. Le lignite a une teneur en soufre beaucoup plus faible que la houille et coûte moins cher à extraire, deux arguments auxquels sont sensibles les Américains.

Houille ou lignite, le charbon n'a donc pas dit son dernier mot. Après avoir été à l'origine de notre monde industriel, il pourrait devenir une grande source « d'énergie nouvelle » de la fin de ce siècle.

Alain LEDOUX

A LA RECHERCHE DES CALORIES PERDUES



On commence à songer à la récupération de la chaleur liée au refroidissement des centrales électriques. Jean Marquis.

La crise de l'énergie va modifier notre habitat. L'isolation, abandonnée à l'ère du gaspillage au profit des immenses baies vitrées encastrées dans de l'acier, devient le maître mot de la construction. En France, les pouvoirs publics ont même tenté d'établir un « label thermique » conciliant l'économie et le confort : c'est le fameux coefficient « G », qui permet de mesurer la déperdition calorifique constatée dans une pièce. Il s'exprime en Watts par mètre-cube et par degré centigrade. Dans un immeuble collectif, il est, en moyenne, de l'ordre de 1,55 W/m³/°C.

Depuis 6 mois, le coefficient G a été rendu plus sévère et sera plus contraignant encore à partir de juillet 1975. Pour l'heure, ce coefficient doit descendre de 0,7 à 1 W/m³/°C selon que l'immeuble collectif est chauffé à l'électricité ou au fuel. Amendes ou refus des permis de construire s'abattront sur les promoteurs qui ne respecteront pas les normes. Tandis que labels et contrats récompenseront les

« loyaux sujets ».

Bien entendu, l'isolation n'est pas « gratuite » : elle est assez généralement estimée de 3 à 7 % du prix total de la construction (selon la qualité d'isolation requise). Mais tous les professionnels du bâtiment reconnaissent que les investissements sont généralement remboursés en moins de 3 ans par les économies réalisées sur le chauffage.

M. Jean Charbonnel, alors Ministre de l'Équipement, déclarait en mars 1974 qu'un investissement de 4 000 F par 100 mètres-carrés équipés permettrait de réduire de 20 % la consommation d'énergie pour une même température à l'intérieur des pièces. Et M. Christian Bonnet, Secrétaire d'État au logement, signalait que si toutes les maisons étaient « normalement » isolées, on économiserait 4 millions de tonnes de fuel par an. Optimisme aussi chez les industriels ; Saint-Gobain, par exemple (qui a mis au point une méthode pour déterminer l'isolant le mieux approprié, dans chaque cas particulier, et le plus

rentable), estime qu'une toiture bien isolée réduit de 90 à 95 % les pertes thermiques et qu'une bonne isolation des murs et des sols les réduit de 60 à 75 %. Dans une interview accordée à « La Vie Électrique », M. Jean-François Turcat, de l'EDF, cite cet amusant exemple : « Imaginez un repas de famille réunissant dix personnes. Chaque être humain dégage une chaleur qui équivaut à la puissance d'un radiateur de 150 watts. Vous êtes 10. Cela équivaut à 1 500 watts. Ajoutons à cela les 600 à 700 watts diffusés par l'éclairage. Nous arrivons au total de 2 200 watts. Pendant ce temps, à condition de posséder une bonne isolation et un système précis de régulation, le chauffage électrique s'efface. Nouvelles économies ».

De la même façon, une pièce bien isolée pourrait « piéger » comme une serre la chaleur naturelle du soleil frappant ses vitres : l'équivalent d'un radiateur de 1 400 watts, la puissance du soleil pouvant être évaluée à 350 watts par mètre carré de vitrage.

Des techniques d'avant-garde

En bref, l'isolation n'apparaît pas seulement comme une nécessité, mais comme un élément de confort à haute rentabilité.

C'est pourquoi le chiffre d'affaires de l'isolation atteindra-t-il en 1975 un chiffre record portant sur des matériaux connus, mais parfois aussi sur des solutions d'avant-garde.

Bien entendu, la fibre de verre, les plastiques expansés, le liège, l'amiante, voire même l'air emprisonné dans un double vitrage figurent-ils parmi les matériaux les plus usuels. Mais de nouvelles solutions sont envisagées. Ainsi, des études faites au Laboratoire de recherches Philips à Aix-la-Chapelle ont montré qu'on pouvait encore considérablement réduire les pertes thermiques par les fenêtres, même en cas de doubles vitres. L'effet peut s'expliquer de la manière suivante. Par suite de la convection, les deux plaques de verre d'un double vitrage prennent respectivement la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur. L'isolement réalisé dépend essentiellement des échanges thermiques qui s'effectuent entre les vitrages. Dans le cas de doubles vitres usuelles, environ 2/3 des transferts de chaleur sont provoqués par le rayonnement et seulement 1/3 par conduction thermique de la couche d'air. Il est possible de réduire sensiblement les pertes par rayonnement en revêtant la surface intérieure des deux vitres de couches réfléchissantes d'oxyde d'étain ou d'indium fortement dopé.

De telles couches ont un pouvoir réfléchissant de 80 à 90 % dans l'infrarouge (qui est le domaine du rayonnement thermique). A condition de leur donner l'épaisseur convenable, de telles couches sont pratiquement totalement transparentes pour la lumière visible. Les vitres ainsi recouvertes et pratiquement incolores ont des pertes par rayonnement réduites d'un facteur 10 ! Précisons, toutefois, que le procédé n'a pas encore été commercialisé.

De leur côté, les services de recherches de Saint-Gobain Industries (filiale de Saint-Gobain Pont-à-Mousson) viennent de découvrir un procédé totalement nouveau dont l'avantage majeur est de pouvoir fibrer non seule-

ment les mélanges vitrifiables les plus divers, mais aussi une gamme très large de matériaux allant des matières plastiques organiques aux oxydes très réfractaires.

Enfin, demeure le problème du meilleur choix des isolants. Il a été fait précédemment allusion au procédé mis au point par Isover-Saint-Gobain qui détermine, par ordinateurs, l'épaisseur optimum d'isolant à prévoir pour la toiture, les murs, les planchers, pour que le bilan financier total (coût annuel du chauffage + amortissement annuel de la dépense globale d'isolation) soit réduit au minimum. Ajoutons-y le « matériel lourd » prévu par un des services de l'EDF : une caméra infrarouge qui prend la « photo » de la température des parois et détermine leur valeur thermique. Mais il existe aussi des instruments plus légers, des sortes de pistolets « détecteurs d'isolation » avec lesquels il suffit de viser et d'appuyer sur la gâchette pour connaître les défauts d'isolation de tel ou tel panneau.

Recycler la chaleur perdue

L'isolation ne constitue, cependant, qu'un moyen (parmi beaucoup d'autres) d'éviter le gaspillage des calories.

S'il ne s'agissait que de se chauffer, il y aurait un moyen efficace pour trouver des thermies à bon compte : en les récupérant là où elles se trouvent et plus particulièrement dans les centrales électriques. On sait qu'elles rejettent dans les rivières ou à l'atmosphère les deux tiers de leur énergie. Le Commissariat à l'énergie atomique et les bureaux d'études de la société Technip songent sérieusement à agir dans ce domaine. Il suffirait de modifier les centrales actuelles pour qu'elles produisent (moyennant un léger sacrifice de rendement électrique), l'équivalent en eau chaude de 20 millions de tonnes de fuel par an. Le procédé consisterait à augmenter la pression des condenseurs dans les centrales et d'exploiter l'eau chaude ainsi obtenue (à 80 ou 100 °C) pour le chauffage des locaux. Entre autres avantages, il faudrait dix fois moins d'eau pour refroidir les centrales et l'on supprimerait la pollution thermique des rivières.

Des groupes d'études vérifieraient, à l'heure actuelle, les possibilités réelles.

Le CEA envisagerait, dans cette même optique, la construction de réacteurs nucléaires simplifiés capables de fournir des mégawatts thermiques et qui ne fabriqueraient donc que de l'eau chaude, à environ 100 °C. Ce ne sont pas là des projets utopiques : des centrales équipées en « énergie totale » (fournissant tout à la fois des kilowatts électriques et des kilowatts thermiques) fonctionnent déjà en Allemagne et en Union soviétique. L'Allemagne étudie actuellement la création d'un réseau national de chauffage qui permettrait l'économie de 55 millions de tonnes d'équivalent pétrole. En URSS, 40 % de l'énergie électrique sont produits dans ces conditions. Dès 1980, les grands centres urbains de Finlande et de Suède (notamment Stockholm et Malmö) seront alimentés en eau chaude par des centrales nucléaires à « énergie totale ». Il se pourrait qu'en France, la centrale de Bugey soit un jour ou l'autre exploitée selon cette formule.

De toute façon, il faudra bien que les Pouvoirs publics, au vu des seules données techniques, définissent la politique à suivre : produire de l'électricité seule, au maximum des possibilités, ou peut être un tout petit peu moins de mégawatts électriques avec beaucoup d'eau chaude. Il serait vraiment surprenant que nos voisins aient seuls le désir et l'envie de retrouver des calories inutilement gaspillées.

De ces calories qui s'égaillent plus ou moins sournoisement, il en existe partout. Aux abords des lampes d'éclairage par exemple, ou des appareils de réfrigération. Il ne s'agit pas là d'économies de bouts de chandelle. Avec les niveaux actuels d'éclairage atteignant souvent 1 000 lux, il est courant de disposer (même avec des tubes à haut rendement) de puissances installées de 40 watts au mètre carré, ce qui correspond à un apport d'énergie thermique de l'ordre de 400 watts par personne dans un local industriel moderne. Cette chaleur peut être récupérée par différents procédés et certains dispositifs à circulation d'eau ont ainsi permis de capter 70 % de l'énergie rayonnée par l'éclairage.



L'isolement thermique des habitations laisse souvent à désirer.

Des systèmes évolués

L'air chaud excédentaire peut aussi être récupéré et recyclé dans l'évaporateur d'un système de réfrigération où il se transforme en calories utilisées pour le circuit d'eau chaude. Ainsi, dans l'immeuble Rhône-Progil, l'appoint calorifique est prélevé de jour sur les luminaires et la nuit sur le réseau électrique par des résistances de chauffage. Au Japon, tout un immeuble d'Osaka a été chauffé et climatisé selon ce principe. Le procédé utilisé est d'une conception voisine de celle des réfrigérateurs ménagers.

Il comporte un circuit de réfrigération au fréon et la chaleur produite lors du processus de réfrigération sert à produire l'eau chaude nécessaire à l'immeuble. Bien entendu, un tel système consomme de l'électricité, mais n'a besoin que de très peu d'énergie pour fournir beaucoup de chaleur : l'énergie thermique récupérée au niveau de l'ensemble moteur actionnant le

système de réfrigération peut représenter jusqu'à 5 ou 6 fois la puissance nécessaire pour le faire fonctionner. Dans l'immeuble d'Osaka, des commandes par thermostat et contrôlées par ordinateur déclenchent automatiquement les mécanismes de chauffage ou de climatisation. Une solution originale et très proche vient d'être proposée par une société française, la SFEE, dont la première installation sera réalisée par une société d'HLM dans le Nord de la France. En voici le principe : une machine frigorifique refroidit l'air vicié extrait des bureaux et transmet à l'air neuf de ventilation la chaleur gratuite qu'elle a ainsi récupérée. Cette quantité d'énergie suffit à compenser les déperditions du bâtiment.

Cependant, dans les immeubles d'habitation, l'éclairage est pratiquement nul et la densité d'occupation très faible. Il a donc fallu, pour conserver au système son intérêt économique, améliorer le dispositif de récupération de chaleur. M. Henri Castets,

Ingénieur à la SFEE, décrit ainsi, dans la « Revue de l'Electricité » l'originalité du système : « Le dispositif de récupération et de traitement de l'air comprend un groupe frigorifique de production d'eau glacée, un ou plusieurs caissons d'extraction d'air vicié équipés chacun d'une batterie alimentée par le liquide refroidi par la machine frigorifique, une ou plusieurs centrales de traitement d'air... Un tel système de récupération est exceptionnellement efficace : l'énergie disponible au condenseur de la machine frigorifique varie de 5,7 à 8,4 KCal/m³ d'air extrait pour des températures extérieures comprises entre -10 et +10 °C. D'après les calculs de la société, pour un logement type F3 de 70 m² dans la région parisienne, la dépense totale pour la ventilation mécanique été-hiver et les jours de chauffage serait approximativement de 7,50 F par m² habitable.



Comme on le voit, l'objectif actuel est la mise au point de nouvelles technologies alliant le confort à l'économie, mais dont la généralisation demandera encore un certain temps.

Mais peut-être la solution idéale est-elle celle présentée au Ministère de la qualité de la vie par un groupe de jeunes architectes. Ceux-ci, Pierre Le Chapellier et Jean-Loup Wallet, responsables du « groupe d'études de la maison écologique » ont conçu, en effet, un logement de 100 m² qui devrait cependant disposer d'environ 1 200 m² de terrain. L'électricité est fournie par une éolienne à hélice tripale alimentant des accus. L'eau est montée du puits par une éolienne dotée d'un réservoir. Le gaz provient de la décomposition des ordures ménagères et d'algues cultivées sous serre. Des panneaux solaires servent au chauffage... et la nourriture vient directement du verger et du potager.

La « maison écologique », qui ignore donc les branchements sur les réseaux publics (eau, gaz, électricité, égout) ne coûterait que 300 000 F.

Et par bonheur, pour la tranquillité de ses occupants, elle ne possède pas le téléphone. Comme on le voit, on n'arrête pas l'anti-progrès !

L. F.



*Près de 10 % de la production d'électricité
de la Nouvelle-Zélande
provient des gisements de vapeur
de Wairakei.*

*Quant à l'Islande, elle a laissé
nombre de ses geysers à la contemplation
des touristes (page de droite).*

LA GÉOTHERMIE

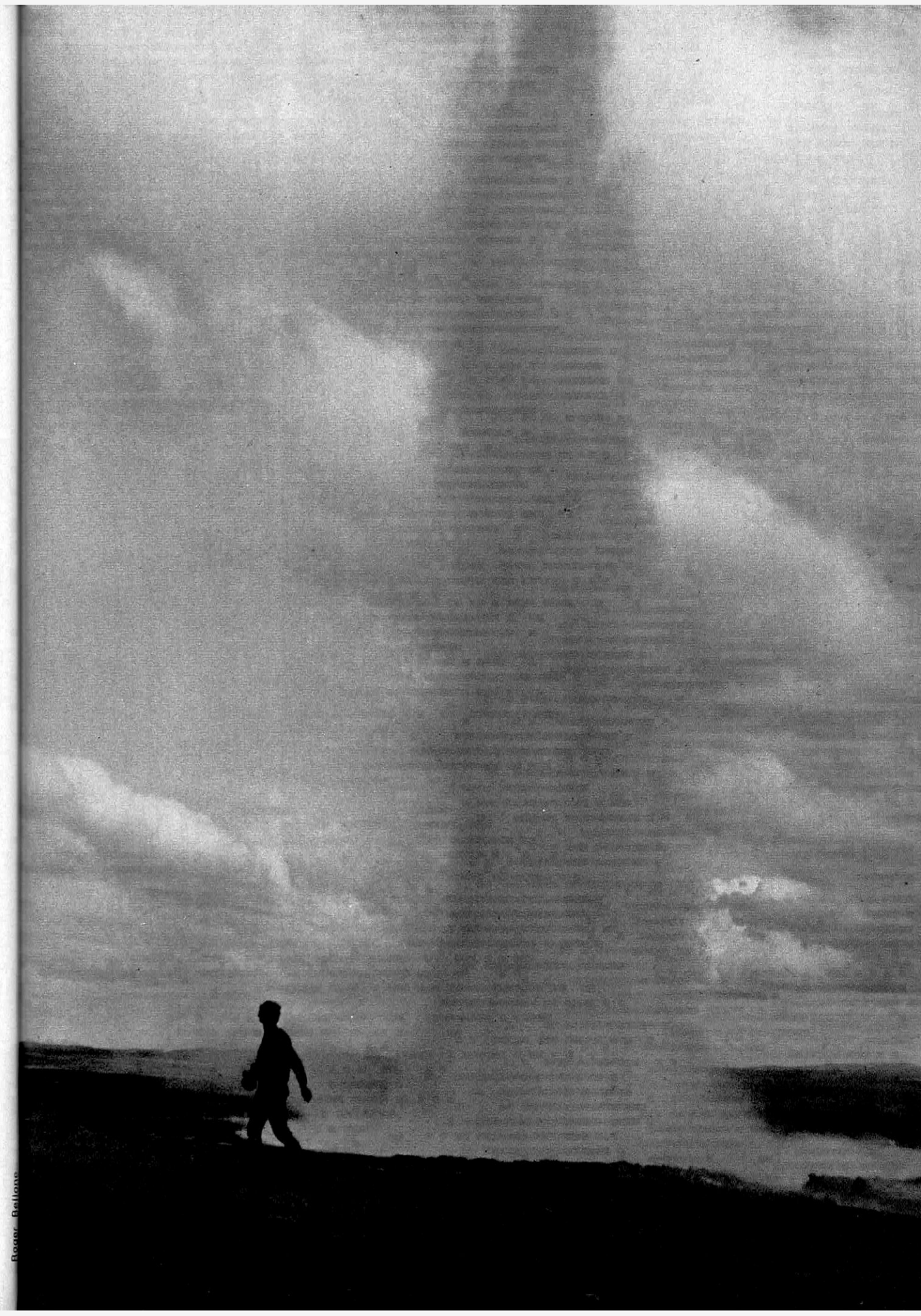
*Sources chaudes et gisements de vapeur
ont été utilisés de longue date de façon empirique.*

*Avec la crise actuelle, il s'agirait
de mener à bien une exploitation systématique de la
chaleur terrestre. Soit pour la production*

*d'électricité (gisements de vapeur
dits de haute énergie), soit pour le chauffage
des habitations ou des installations agricoles par des
eaux chaudes (gisements de basse énergie).*

*Mais la prospection des gisements géothermiques pose
des problèmes très complexes.*





● La géothermie, cette chaleur propre de la terre qui est très probablement due à la désintégration d'éléments radioactifs entrant dans la composition des couches profondes de notre planète, est utilisée depuis l'Antiquité. Les Romains ont ainsi fait grand usage des sources thermales ; la localité française de Chaudes-Aigues (Cantal) se chauffe en bonne partie avec des eaux sortant à 81 ou 83 °C de sources naturelles, et ce depuis le Moyen Age. Peu après leur arrivée en Nouvelle-Zélande, il y a quelques siècles, les Maoris ont utilisé la vapeur sortant du sol pour cuire leur nourriture.

La géothermie n'est donc pas, à proprement parler, une source nouvelle d'énergie. Mais elle a connu après la deuxième guerre mondiale de spectaculaires développements. Et la crise énergétique actuelle l'a, bien évidemment, mise en vedette. Pourquoi, en effet, ne pas utiliser la chaleur naturelle de la terre ? Cette chaleur, tous ceux qui travaillent habituellement dans des mines ou qui les visitent occasionnellement la ressentent. Plus la profondeur augmente, plus il fait chaud, le gradient géothermique moyen étant d'environ 3 °C pour 100 mètres. Il ne s'agit là que d'une valeur moyenne.

Dans la réalité, il existe des anomalies locales plus ou moins importantes : 5 °C en Alsace, 14 °C en Guadeloupe, toujours pour 100 mètres. Les anomalies les plus fortes sont évidemment les plus intéressantes. Où les trouve-t-on ? Dans les régions volcaniques actuellement ou récemment actives, et dans certaines zones sismiques (même si les tremblements de terre n'y sont ni fréquents ni violents).

Dans l'un et l'autre cas, la faiblesse locale de l'écorce terrestre permet probablement, à quelques centaines ou à quelques milliers de mètres sous la surface de la terre, la mise en place d'une

poche magmatique alimentant (ou ayant alimenté) des volcans ou une remontée du manteau (1).

Les zones des plus fortes anomalies sont évidemment celles où l'on peut trouver des gisements géothermiques de haute énergie : c'est-à-dire des réservoirs d'eau surchauffée (de 200 à 400 °C) et sous très fortes pressions, cette eau pouvant être amenée à la surface en phase liquide ou en phase gazeuse.

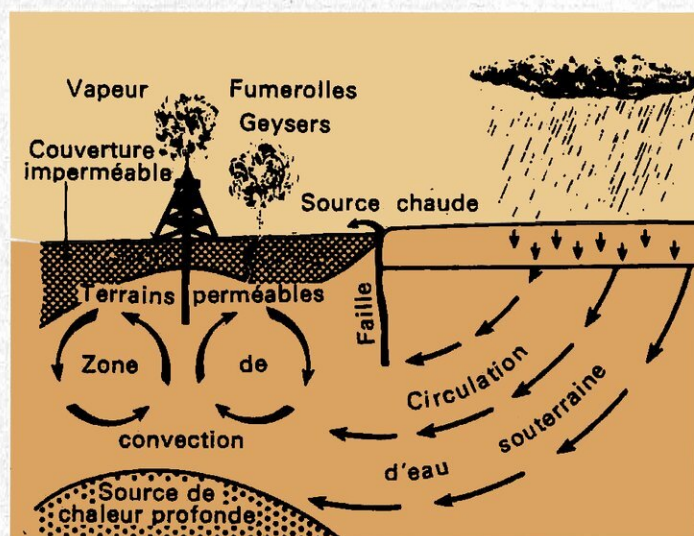
Mais un flux thermique moyen ou très légèrement supérieur à la moyenne peut suffire pour créer des gisements géothermiques dits de basse énergie. A raison de 3 °C tous les 100 mètres, un aquifère situé à 2 000 mètres de profondeur aura une température de 60 °C à laquelle s'ajoute la température du sol en France, 10 °C en général. Si le gradient géothermique atteint 5 °C pour 100 mètres, la température de l'aquifère sera de 100 °C.

On ne peut certes utiliser directement cette eau chaude pour fabriquer de l'électricité : il faudrait la vaporiser sous basse pression ou s'en servir pour vaporiser un liquide à basse température d'ébullition (ammoniac, isobutane, fréon). Il est plus simple de l'employer telle quelle à des usages domestiques (chauffage et sanitaire), agricoles (cultures sous serres, élevage, pisciculture...) ou sportifs (piscine).

Toutes ces utilisations peuvent d'ailleurs se faire en cascade, c'est-à-dire que l'eau chaude naturelle sert successivement à plusieurs usages selon la température nécessitée par chacun d'eux.

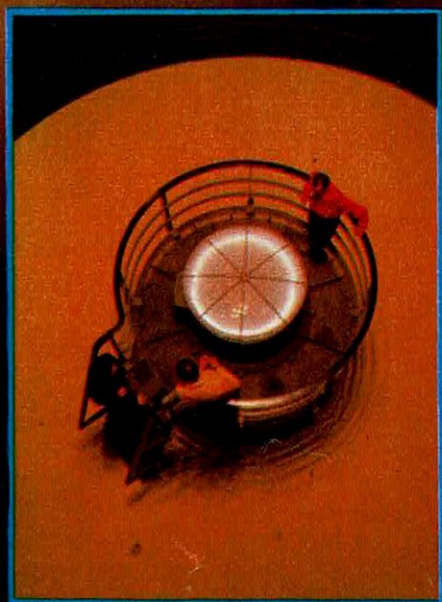
Notons, que la vapeur surchauffée des gisements de haute énergie peut, elle aussi, servir à

(1) Le manteau est la couche constitutive de la terre qui est située entre la croûte et le noyau. Il comprend donc tout ce qui est entre 70 et 2 900 kilomètres de profondeur.



Contrairement à ce qu'on avait cru, eaux thermales et gisements de vapeur ne proviennent pas des eaux juvéniles issues des magmas des profondeurs de la terre. Ils sont alimentés par l'infiltration.

Avec ses 350 MW, la centrale de Serre-Ponçon se classe parmi les premières usines hydro-électriques en France. Sa retenue d'eau en fait le premier réservoir saisonnier de notre pays.



divers usages après son passage dans les turbines d'une centrale.

Certains inconvénients

Les eaux chaudes naturelles (surchauffées ou non) sont très corrosives et impropres aux usages domestiques. Très souvent, elles sont chargées en sels minéraux — 250 grammes par litre à Imperial Valley dans le Sud de la Californie, alors que la salinité moyenne de l'eau de mer est de 35 grammes par litre. A part la vapeur sèche qui, même condensée, peut être utilisée directement⁽²⁾, on se sert donc fréquemment de l'eau thermale par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur où les eaux salées abandonnent une partie de leurs calories au profit d'eaux douces qui, réchauffées, sont lancées dans les circuits de distribution. Ainsi réduit-on au maximum les canalisations coûteuses en matériaux spéciaux résistants à la corrosion.

La présence de quantités importantes de sels minéraux peut fournir à la géothermie des sous-produits économiquement intéressants. Lorsque ceux-ci ne sont pas récupérés, se pose un problème : celui des rejets de l'eau thermale refroidie. Dans la plupart des cas, on ne peut la déverser dans les rivières. La meilleure solution est la réinjection, par un puits spécial, dans l'aquifère d'origine.

La pollution qui accompagne souvent les eaux thermales fait de la géothermie une énergie naturelle un peu particulière. Les autres (marémotrice, maréthermique, éolienne, solaire) ont en effet en commun la qualité de ne pas être polluantes⁽³⁾, contrairement aux sources d'énergie fossiles ou nucléaires qui le sont toutes. Mais la géothermie rejoint les autres énergies naturelles dans le fait qu'elle n'est pas transportable. Elle doit être utilisée ou convertie sur place. Et même transformée en électricité, elle reste soumise aux limites de transport de celle-ci.

De toutes façons, la géothermie restera toujours une énergie d'appoint (à échelle nationale ou mondiale). Mais ce peut être un appoint intéressant par les économies de combustibles fossiles qu'elle permet.

Les gisements de haute énergie

Pendant longtemps, on a cru que l'eau surchauffée ou la vapeur des gisements géothermiques de haute énergie était issue de l'eau juvénile, c'est-à-dire qu'elle provenait des magmas montant à proximité de la surface de la Terre. En fait, comme M. Jean Goguel, vice-président du Bureau de recherches géologiques et minières

François Larderel Dauphinois et comte toscan

En 1818, François Larderel, alors âgé de 29 ans, originaire de Vienne (Dauphiné), loue un terrain sur la commune de Pomarance en Toscane. Il y installe une petite usine pour extraire le bore des « lagoni » de Montecerboli, des étangs boueux et bouillonnants d'où jaillissent de violents jets de vapeur. En 1827, Larderel a l'idée de couvrir l'étang d'une coupole de pierre de façon à capter la vapeur. Ainsi pourra-t-il réchauffer les chaudrons où les solutions d'acide borique se concentrent. Dix ans plus tard, le grand-duc Léopold II de Toscane l'annoblit sous le nom de comte de Montecerboli et, en 1846, donne aux installations le nom de Larderello en l'honneur de l'« inventeur » de l'énergie géothermique.

En 1904 l'électricité fut produite à Larderello pour la première fois au monde avec de la vapeur naturelle : on réussit à allumer quatre ampoules. Équipé progressivement à partir de la première guerre mondiale, le gisement de Larderello a actuellement une puissance installée de 405,6 mégawatts.

l'a montré en 1953, les eaux ou la vapeur des gisements de haute énergie sont essentiellement des eaux de pluies qui se sont infiltrées dans le sol et sont parvenues dans une couche poreuse et perméable reposant sur les roches chaudes.

L'eau de la base de l'aquifère, chauffée par en dessous, voit diminuer sa densité. Elle monte donc dans sa roche-magasin et est entraînée par une circulation convective, tout comme l'est de l'eau que l'on chauffe dans une casserole posée sur une source de chaleur.

Pour qu'il y ait gisement géothermique, il faut que la couche aquifère soit recouverte de roches suffisamment imperméables faisant office de couvercle. Ainsi, ne peut-il y avoir qu'une minime dissipation de la chaleur de l'aquifère dans l'atmosphère, ce qui fait monter la température de l'eau. La pression qui croît déjà avec la profondeur est encore augmentée par la montée de la température. Et il ne faut pas oublier que la température d'ébullition de l'eau augmente avec la pression : si l'eau bout à 100 °C sous une pression de 1 bar, son point d'ébullition est un peu supérieur à 200 °C lorsque la pression atteint 20 bars et à 300 °C sous une pression de 100 bars.

Si l'eau circule dans sa roche-magasin en phase gazeuse, elle donnera de la vapeur sèche utilisable directement pour faire tourner des turbines entraînant des alternateurs. Si l'eau circule en état de surpression et de surchauffe tel qu'elle soit en phase liquide, elle subira certes une vaporisation lors de sa remontée vers la surface, mais cette vaporisation sera partielle et la vapeur récupérée sera « humide », c'est-à-dire qu'elle

(2) La vaporisation fait office de distillation, si bien que la vapeur sèche ne contient pas de sels minéraux mais peut contenir des gaz condensables. La vapeur condensée à la sortie des turbines donne donc de l'eau chaude directement utilisable, presque pure.

(3) L'exploitation de l'énergie éolienne peut toutefois être bruyante. Quant à l'énergie géothermique, la purge obligatoire des forages d'eau surchauffée fait autant de bruit qu'un Boeing 747 au décollage. Et cette purge dure plusieurs semaines ou plusieurs mois.

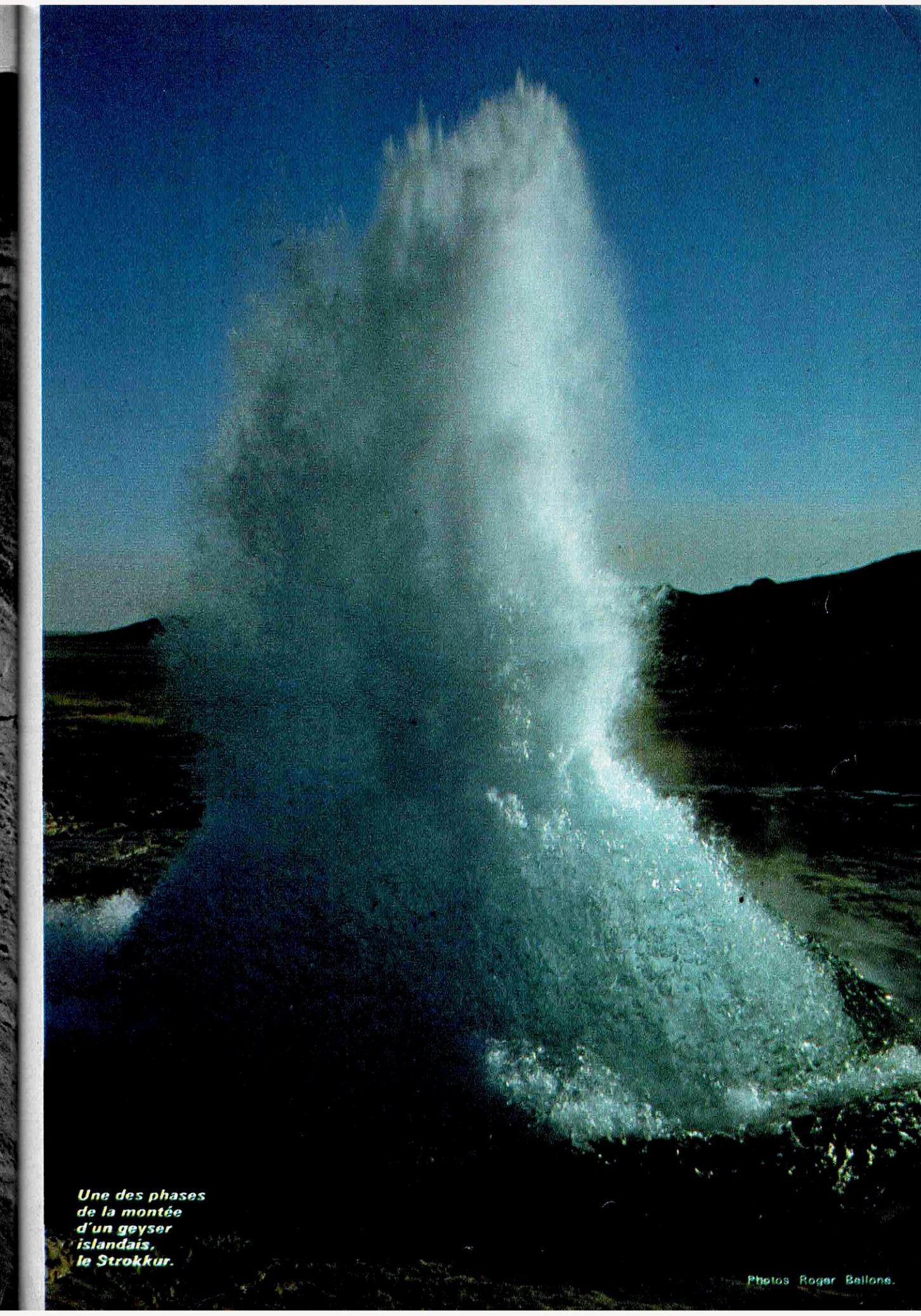


USIS

La centrale « The Geysers », en Californie du Nord, met à profit la vapeur du sous-sol pour faire tourner ses turbines. L'exploitation a débuté il y a quinze ans; sa puissance atteindrait 600 MW en 1975.



*En Islande,
le Blesi.
sources chaudes
dans deux bassins
en forme de 8.
L'eau est
constamment
bleu turquoise
par suite
de la présence
de silice à l'état
colloïdal.*



*Une des phases
de la montée
d'un geyser
islandais,
le Strokkur.*

Photos Roger Ballons.

contiendra une quantité variable de fines gouttes d'eau.

Cette eau liquide devra être complètement éliminée avant que la vapeur puisse être employée dans les turbines : chaque gouttelette d'eau, lancée à grande vitesse (de l'ordre de 1 000 kilomètres à l'heure) sur une pale de turbine, se comporte en effet comme une balle de mitrailleuse !

Les gisements de vapeur sèche sont donc beaucoup plus intéressants que les gisements de vapeur humide. Malheureusement ils sont beaucoup plus rares que les seconds.

On ne connaît guère que cinq gisements de vapeur sèche dans le monde entier : un en Italie (Larderello), un aux Etats-Unis (the Geysers, en Californie), un au Mexique (Valle-Caldera) et deux au Japon (Matsukawa et Otake).

Alors qu'on a déjà repéré, ici ou là, une bonne centaine de gisements de vapeur humide.

Une prospection difficile

Qu'ils soient de vapeur sèche ou humide, les gisements géothermiques de haute énergie sont difficiles à détecter et encore plus à évaluer. Certains, comme à Larderello ou à Wairakei (Nouvelle-Zélande), se signalent en surface par des fumerolles, des geysers ou des sources chaudes. Ce sont évidemment ces gisements qui ont été les premiers exploités. Depuis une dizaine d'années, on essaye diverses méthodes de prospection, mais on connaît encore trop peu de choses sur les phénomènes physico-chimiques liés à la géothermie pour que ces méthodes soient très sûres. De toutes façons, on n'utilise jamais une méthode isolément. On s'appuie sur plusieurs, de façon à constituer un faisceau de présomptions.

Les régions prometteuses

On peut espérer trouver des gisements géothermiques de haute énergie dans les grandes zones instables du globe : le « cercle de feu » du Pacifique (c'est-à-dire le grand système montagneux qui court sur toute la façade occidentale des deux Amériques et les guirlandes des arcs insulaires, Kamtchatka compris, qui bordent l'est de l'Asie) ; l'arc caraïbe ; le système alpin ; le rift africain et les îles émergeant des dorsales subocéaniques.

Pour la France métropolitaine, les espoirs sont très minces, bien qu'il ne soit pas tout à fait impossible de trouver un jour quelques gisements de haute énergie en Limagne (le volcanisme d'Auvergne est très récent) et peut-être aussi dans le nord de l'Alsace et sur le front nord des Pyrénées.

En revanche, dans certains territoires et départements d'outre-mer, Guadeloupe, Martinique, Réunion, Territoire français des Afars et des Issas, et aussi dans le condominium franco-britannique des Nouvelles-Hébrides, il est raisonnable d'espérer des gisements géothermiques de haute énergie, étant donnée l'activité volcanique qui s'y manifeste.

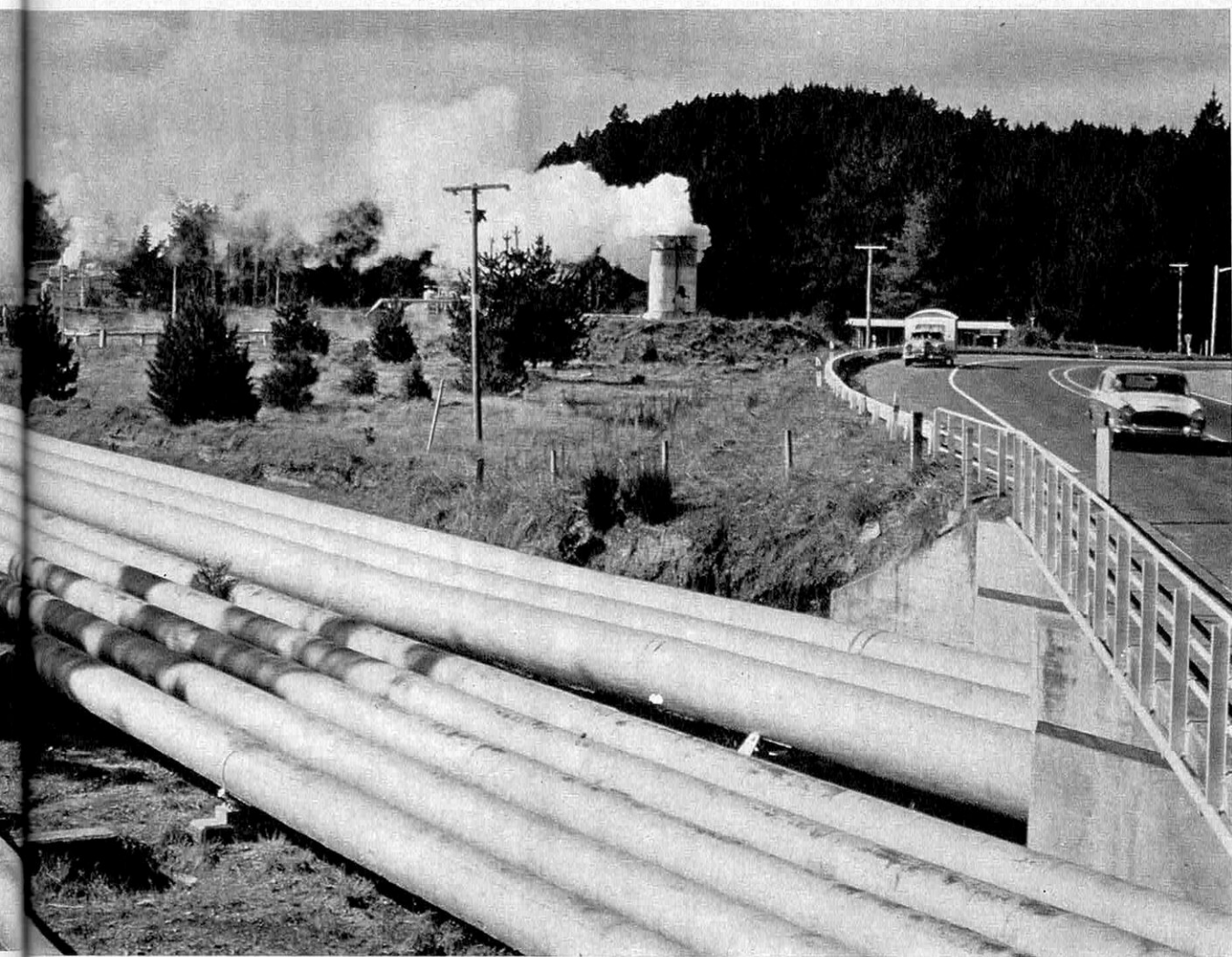


Connus depuis longtemps des Maoris, les gisements de

On peut classer les méthodes de prospection suivant leur mode d'approche. Il y a d'abord l'approche par des techniques classiques (aéromagnétisme, gravimétrie, photogéologie, aérothermographie, études du volcanisme et de la sismicité naturels) qui toutes permettent de se faire une idée de la structure de la région et d'imaginer la présence relativement proche de magmas chauds et d'horizons susceptibles d'être des roches-magasins ou des roches-couvercles.

On recourt ensuite aux études plus localisées : thermométrie en surface et dans de petits forages profonds d'une cinquantaine de mètres ; analyse des sources chaudes (la teneur en silice augmente avec la température de l'aquifère d'origine) ; rapport sodium/potassium (indicateur très relativement fidèle de la température de l'aquifère) ; résistivité du sous-sol (la roche-magasin d'un aquifère chaud est meilleure conductrice d'électricité qu'un terrain imprégné d'eau froide) ; analyse des gaz émis aux fissures naturelles ; analyses des dépôts minéraux éventuels (des auréoles de mercure signalaient par exemple les points les plus intéressants du gisement de Larderello).

Le nombre de méthodes utilisables semble être un gage important de succès, mais la pros-



de Wairakei, en Nouvelle-Zélande, sont exploités de façon rationnelle (production d'électricité) depuis 1958.

pection des gisements géothermiques est un champ d'études trop jeune pour qu'aucune d'entre elles soit réellement sûre. Finalement, seul le forage de plusieurs puits permet d'évaluer l'importance d'un gisement de haute énergie. Encore peut-on être déçu par un troisième ou quatrième forage alors que les précédents avaient pu faire croire que l'on se trouvait devant un gisement intéressant. C'est ce qui s'est passé pendant l'été 1974 à la Guadeloupe.

Pressenti par des études du B.R.G.M., le gisement de Bouillante a été découvert en 1969 sur la côte occidentale de ce département d'Outre-Mer, grâce à un premier forage fait par la société Eurafrep. On envisageait déjà la possibilité d'alimenter la Guadeloupe en électricité grâce à une centrale tournant à la vapeur naturelle. Mais le quatrième puits, foré l'été dernier, a arrêté d'émettre de la vapeur après quelques heures...

Une mise en exploitation progressive

L'impossibilité d'évaluer en l'état actuel des techniques l'ensemble d'un gisement géothermique de haute énergie et l'obligation d'utiliser la vapeur (sèche ou humide) le plus près possible

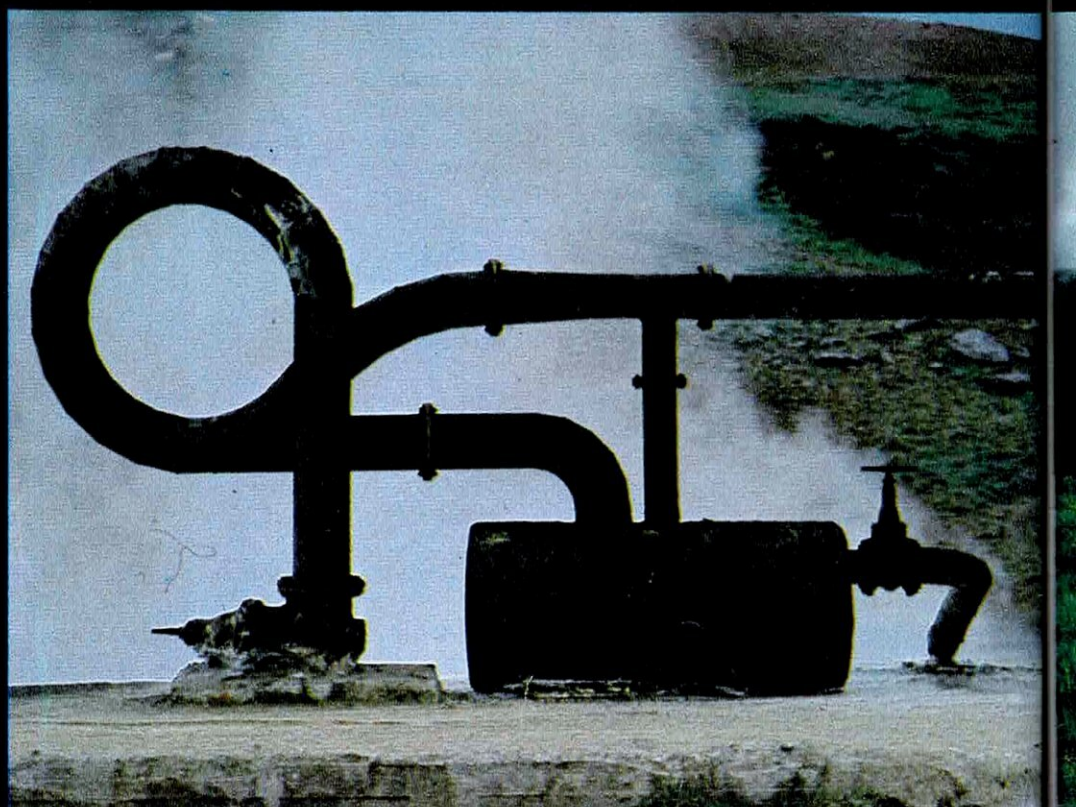
des puits de façon à éviter des conduites énormes et calorifugées, explique que la mise en exploitation des gisements soit très progressive.

L'exploitation des Geysers (USA) a débuté en 1960 avec une petite unité de 12,5 mégawatts. Avec des forages et des unités supplémentaires, la puissance installée est passée à 50 MW en 1966, 83 MW en 1969, 184 MW en 1971, 290 MW en 1972, et enfin, avec 9 unités, à 396 MW en 1973. Elle devrait atteindre 608 MW en 1975.

En dépit de l'intérêt que suscite la géothermie de haute énergie, la puissance installée actuellement ne représente qu'une infime partie de la capacité totale des centrales. En 1973, la puissance installée des centrales géothermiques était de 405,6 MW en Italie ; 396 MW aux Etats-Unis ; 170 MW en Nouvelle-Zélande ; 75 MW au Mexique ; 30 MW au Japon ; 30 MW au Salvador ; 6 MW en URSS ; 3 MW en Islande (dans ce dernier pays, l'utilisation domestique et agricole d'eau surchauffée et sous pression équivaut à une installation de 300 MW).

Mais, de toutes façons, la géothermie de haute énergie restera forcément limitée par la rareté des gisements et aussi par le fait que leur localisation ne coïncidera pas souvent avec celle des grandes zones industrielles qui sont les plus

La géothermie de haute énergie est le fait des terrains volcaniques. Ce volcanisme peut parfois mettre en danger les populations, comme dans le port islandais de Heimaey, en partie détruit par le réveil d'un volcan au début de 1973. Les sources d'eau surchauffées sont néanmoins largement captées et domestiquées dans le pays pour le chauffage ou l'industrie.

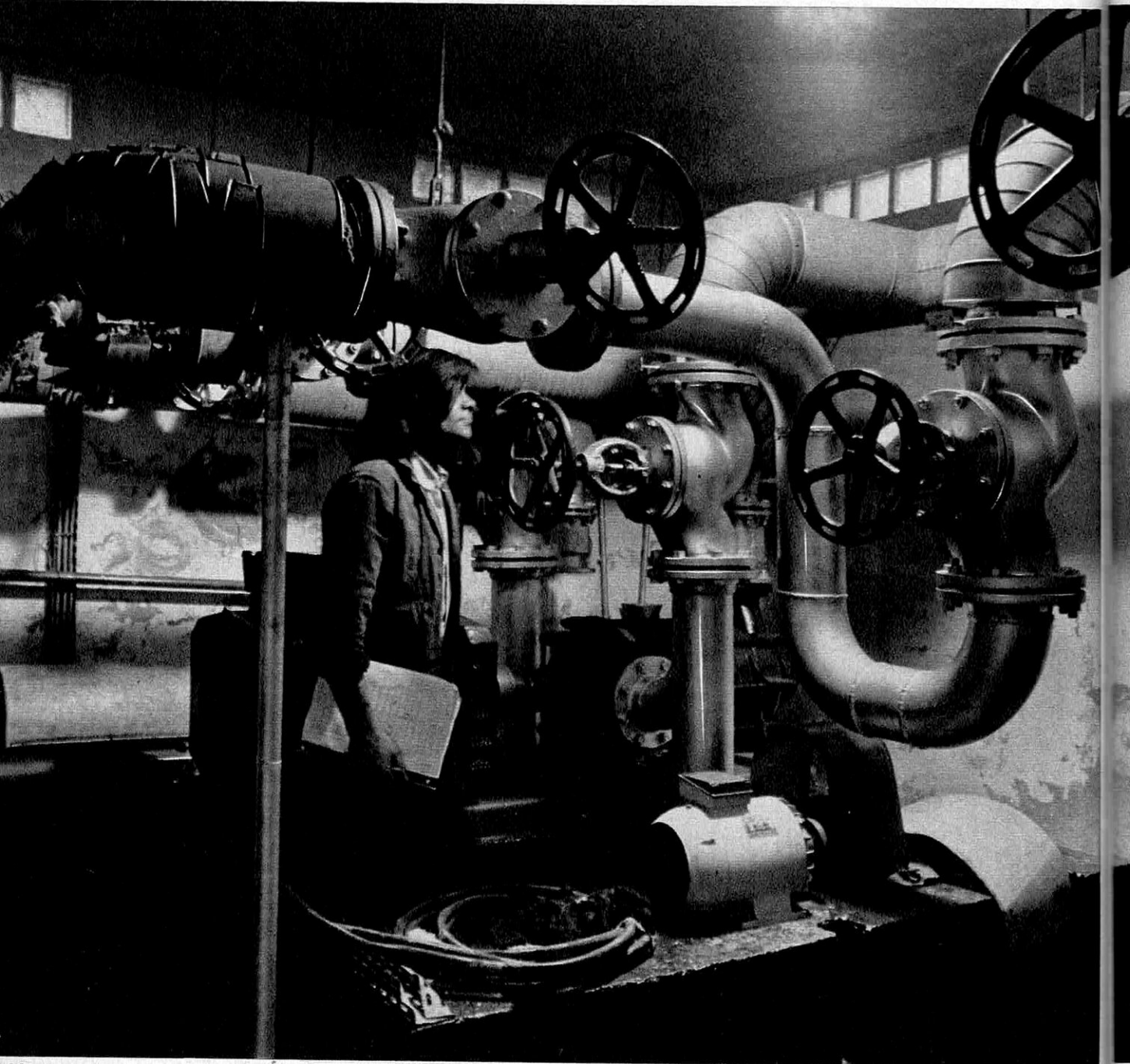


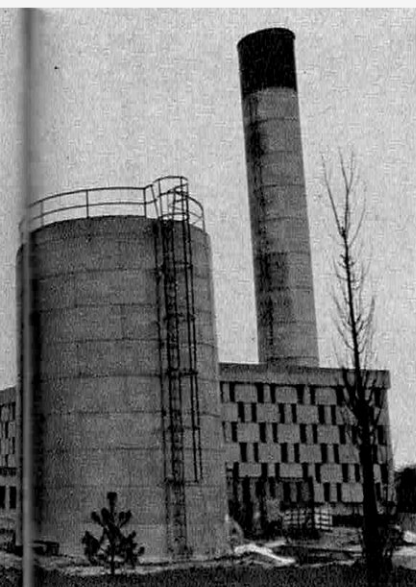


*Les eaux chaudes (plus de 70°)
de la nappe du Dogger, qui s'étend
sous une bonne partie du bassin parisien,
sont prélevées à 1 800 m de profondeur
pour fournir, par l'intermédiaire
d'échangeurs de chaleur, l'eau sanitaire
aux habitants de la ZUP de l'Almont, à Melun.*

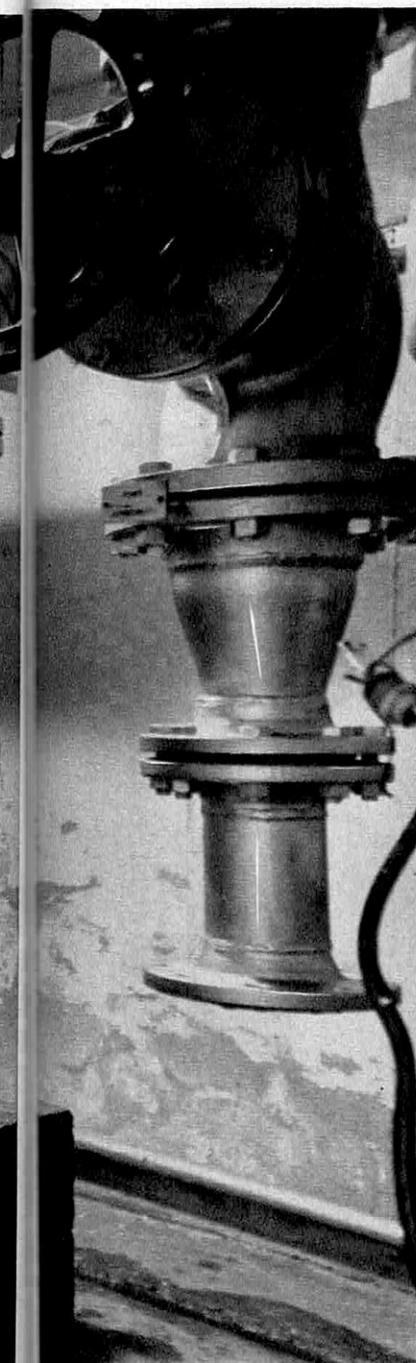
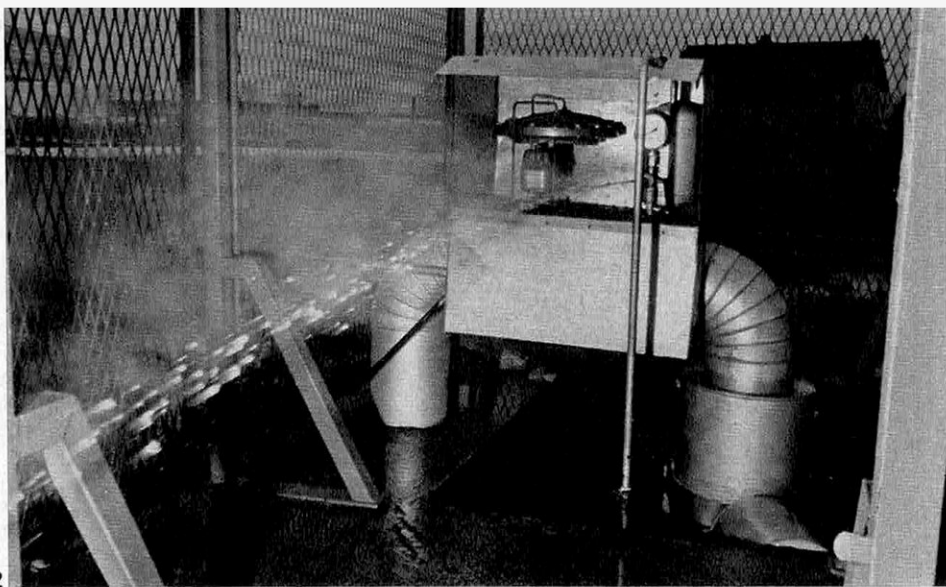
*On trouvera ici quelques aspects
de l'installation réalisée
par l'entreprise Laurent Bouillet.*

- (1) réservoirs-tampons ;*
- (2) la tête du forage de prélèvement ;*
- (3) la station de pompage installée en sous-sol*
- (4) la batterie d'échangeurs
de chaleur en titane.*

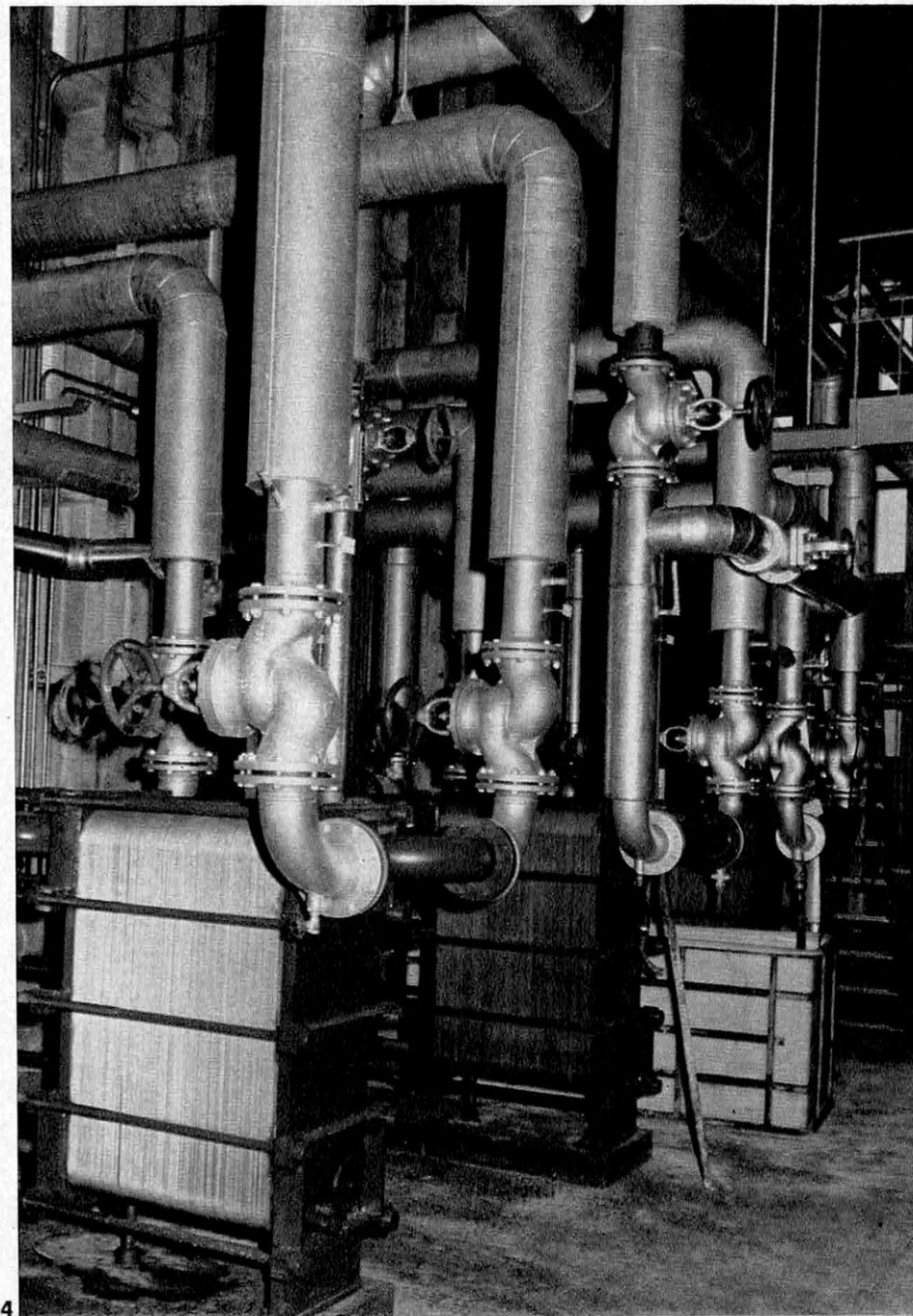




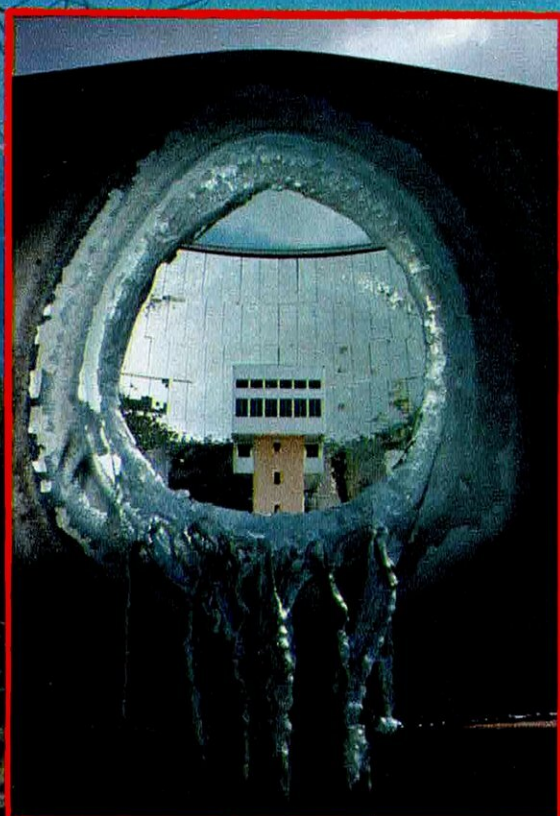
2



4



Photos Jean Marquis



Le four solaire d'Odeillo est une construction unique au monde. Le diamètre du miroir atteint 54 m. Au foyer, la température peut atteindre 3 500°. Le four est utilisé pour l'étude fondamentale du comportement des métaux et des matériaux réfractaires et pour certains travaux industriels.





grandes consommatrices d'énergie. Toutefois, il ne faut pas oublier que certaines industries grandes consommatrices d'énergie — telle celle de l'aluminium — sont allées précisément s'installer dans des régions où l'énergie est abondante.

Quoi qu'il en soit, les Etats-Unis envisagent, d'ici à 1984, de consacrer 600 millions de dollars (2,8 milliards de francs) aux recherches et études sur cette énergie, bien que l'on estime de 2 à 4 % seulement la part que pourrait avoir l'électricité géothermique dans les 3300 gigawatts de puissance installée prévus pour 1985.

De l'eau chaude à bon marché

Comme nous l'avons déjà vu plus haut, un flux thermique moyen, ou très légèrement supérieur à la moyenne, suffit à chauffer les aquifères profonds et à assurer ainsi des ressources géothermiques de basse énergie. Là, nul besoin de rechercher des régions volcaniques ; les bassins sédimentaires épais de plusieurs milliers de mètres suffisent, du moment que certains de leurs

Les roches chaudes et sèches

La géothermie de haute énergie et celle de basse énergie ont besoin, l'une et l'autre, d'un aquifère dont la roche-magasin soit suffisamment poreuse et perméable pour que l'eau, surchauffée ou non, puisse y circuler et être drainée vers les puits qui ont été forés. Or il existe, dans les régions à gradient géothermique élevé, des roches chaudes certes, mais sèches. On a donc songé à fracturer la roche de façon à y créer un réseau artificiel de circulation. Ce réseau créé, on y injecterait de l'eau froide qui se réchaufferait au contact de la roche chaude et serait ensuite récupérée.

La réalisation de tels projets se heurte toutefois à plusieurs difficultés.

● *Quel que soit le moyen employé pour fracturer — pression hydraulique (comme on le fait déjà dans les champs pétroliers dont on veut augmenter la perméabilité) ou petites explosions nucléaires souterraines — on n'est pas sûr que le réseau de fractures soit suffisamment étendu et ramifié pour qu'une bonne circulation d'eau puisse s'y établir.*

● *Les injections d'eau froide risquent de refroidir, à plus ou moins longue échéance, les roches chaudes.*

● *Les injections d'eau sous pression destinées à la fracturation des roches chaudes peuvent créer un risque sismique non négligeable. De telles injections sous pression, faites dans le but de se débarrasser de fluides toxiques, ont suffi à déclencher, entre 1962 et 1966, des séismes au Colorado, pourtant connu comme une région calme. Or, les roches sèches et chaudes se trouvent dans les zones de faiblesse — donc dans des zones sismiques — de l'écorce terrestre.*

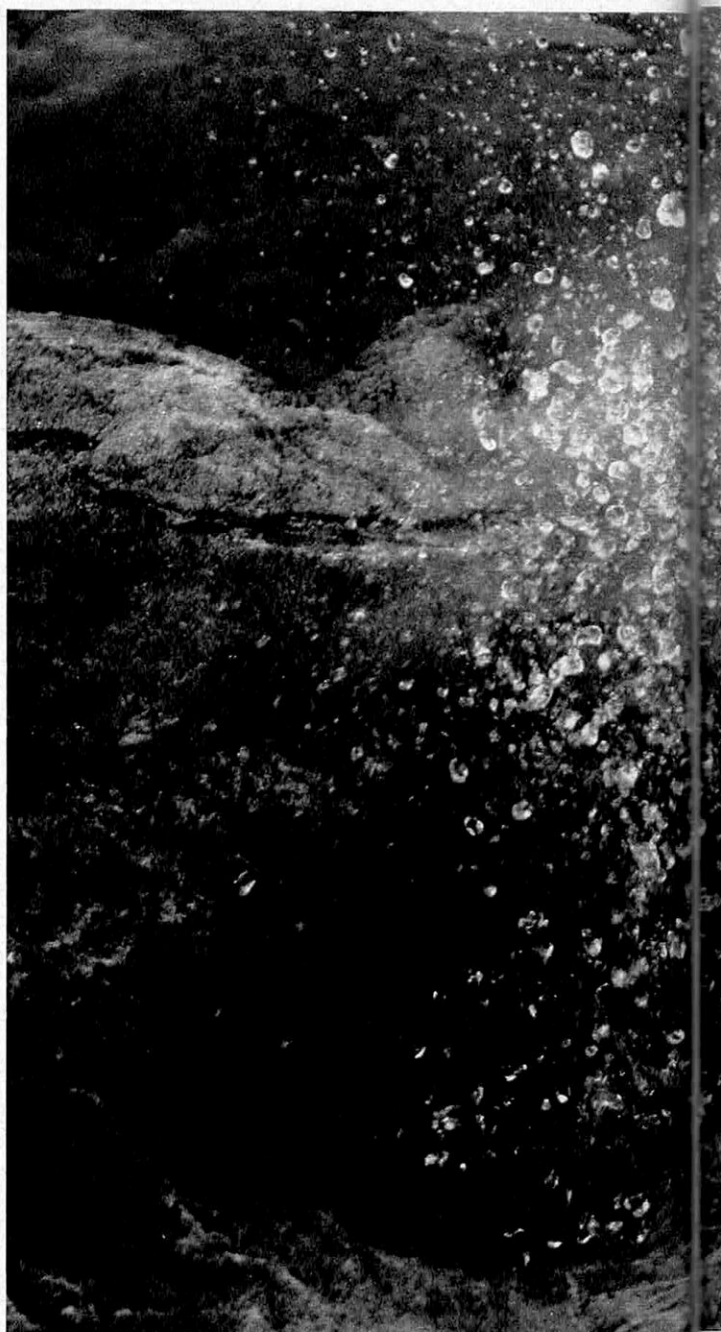


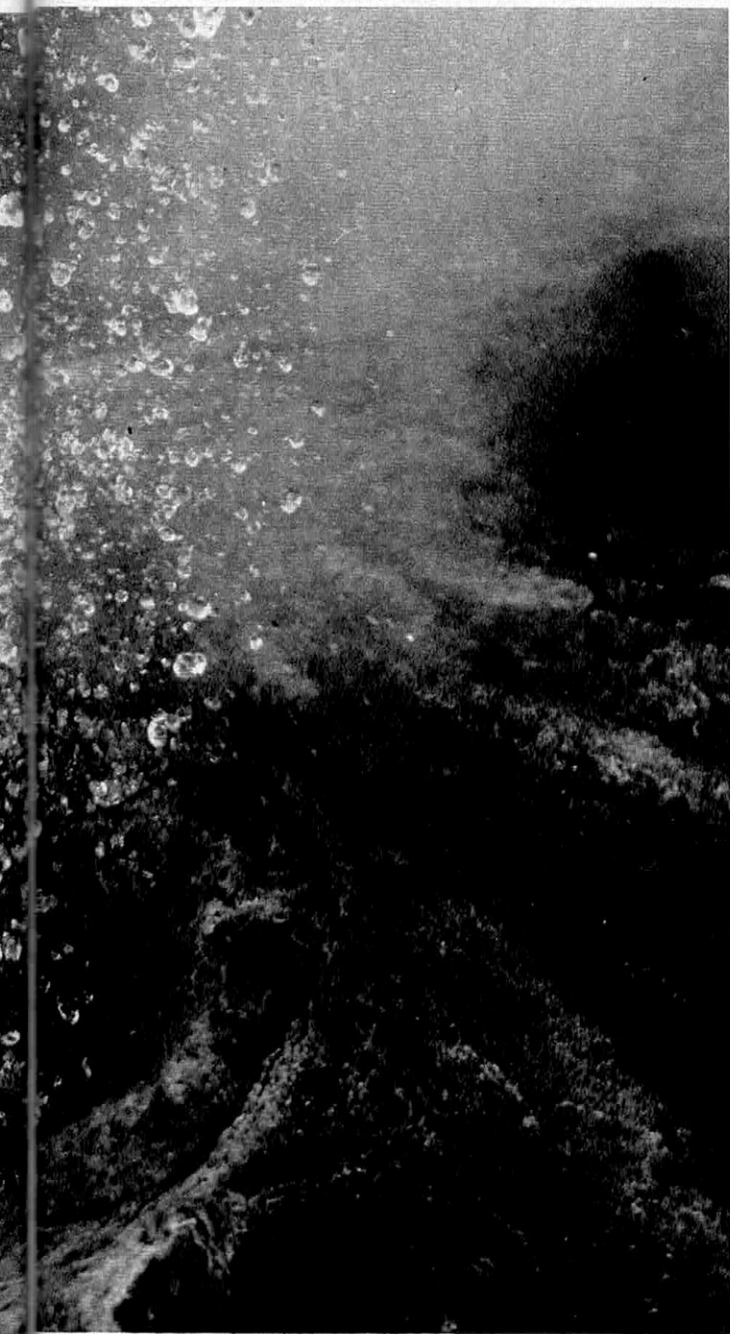
Photo Roger Bellone

La présence des gisements n'est pas toujours aussi

étages profonds sont des aquifères. Or les bassins sédimentaires sont plus largement répandus sur les continents que les zones volcaniques.

La géothermie de basse énergie est sûrement moins spectaculaire que celle de haute énergie. Elle ne sert pas, en l'état actuel des choses, à fabriquer de l'électricité. Mais elle a le mérite, fort appréciable depuis le renchérissement du prix du pétrole, de pouvoir fournir de l'eau chaude pour laquelle aucun combustible fossile n'aura été consommé. Les Hongrois l'ont compris depuis longtemps.

Le développement récent de la géothermie hongroise de basse énergie est tout à fait remarquable. Commencée en 1962 à Szeged par le forage d'un puits destiné au chauffage urbain, l'exploitation des eaux thermales a surtout pris



si manifeste, et la prospection pose alors des problèmes.

de l'extension dans l'agriculture. En 1966, 5 000 mètres carrés de serres étaient chauffés par de l'eau chaude naturelle ; en 1970 on en était à 790 000 mètres carré et en 1973 à 1 500 000 mètres carré ! Ainsi peut-on cultiver toute l'année des paprikas (condiment obligatoire de la cuisine hongroise), des primeurs (tomates, radis...), des fleurs. Ainsi peut-on pratiquer l'élevage intensif des porcs.

Les installations hongroises sont simples et rustiques ; les études des nappes profondes sont empiriques. Mais cela n'empêche pas d'utiliser en cascade les quelque 500 000 mètres cube d'eau chaude (de 60 °C à 100 °C le plus souvent) que, chaque jour, environ 500 puits vont chercher à des profondeurs généralement comprises entre 1 500 et 2 000 mètres.

Notons que la salinité des eaux thermales hongroises est assez faible (de 1 à 3 grammes par litre), ce qui permet, en bout de course, de rejeter les eaux refroidies dans le réseau hydrographique de surface. Selon les responsables hongrois, l'utilisation des eaux thermales équivalait, en 1973, à une puissance installée de 1 500 mégawatts.

Ce qui est fait en France

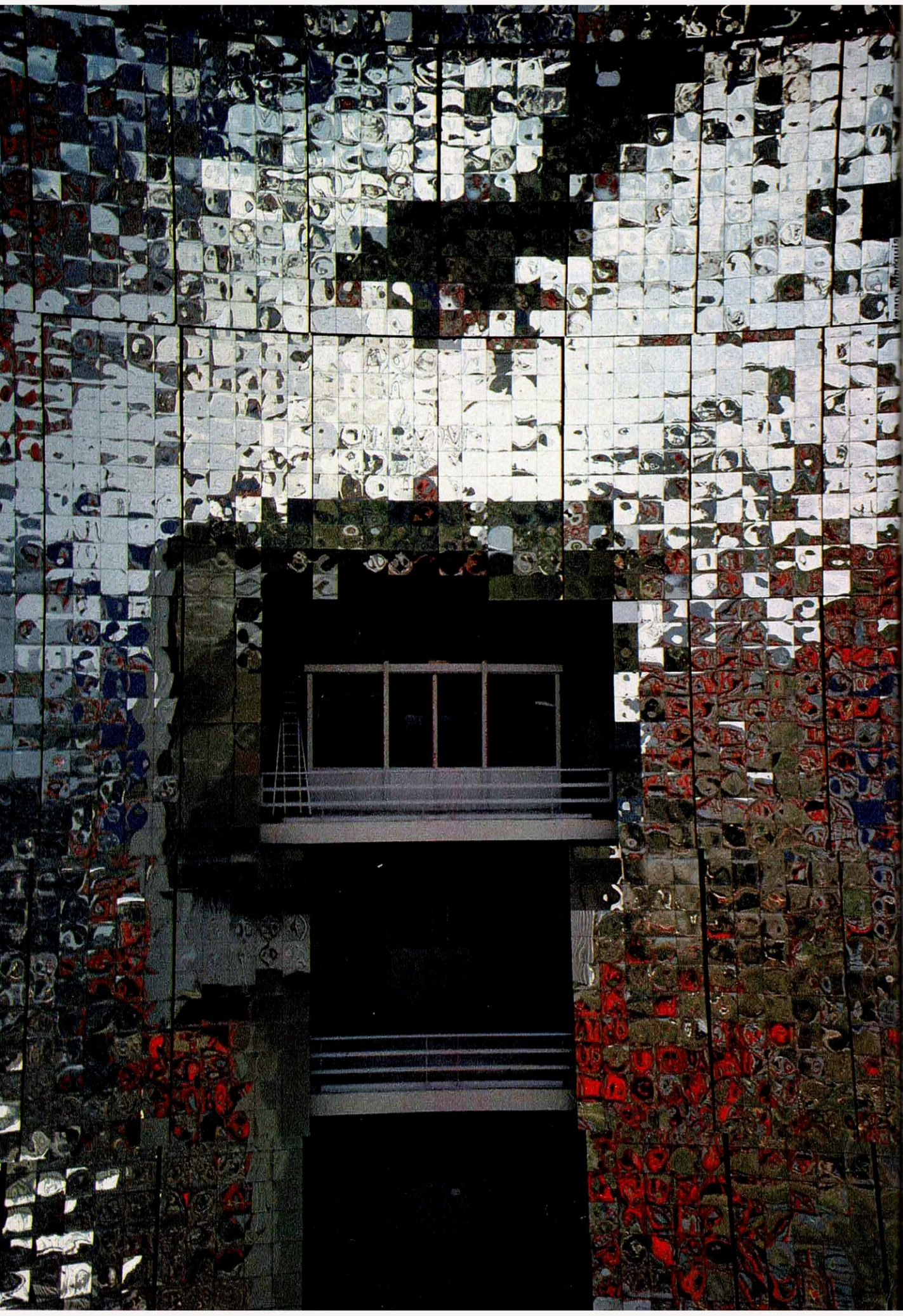
L'exemple hongrois pourrait certainement être imité dans de nombreux pays, et en particulier en France où existent deux bassins sédimentaires étendus et épais (les bassins parisien et aquitain), ainsi que divers fossés ou sillons (Alsace, Limagne, couloir rhodanien), plus étroits certes, mais où les sédiments se sont accumulés sur des milliers de mètres. En outre les bassins sédimentaires français sont assez bien connus : les « pétroliers » y ont fait plusieurs milliers de forages (1 400 dans le Bassin parisien, 900 dans le bassin aquitain, 300 dans le couloir rhodanien et la plaine du Languedoc, 200 en Alsace, 200 dans la Bresse, le Jura et la Savoie). Ils ont trouvé très peu de pétrole, mais ils ont tiré, de leurs forages, une très bonne connaissance de la stratigraphie.

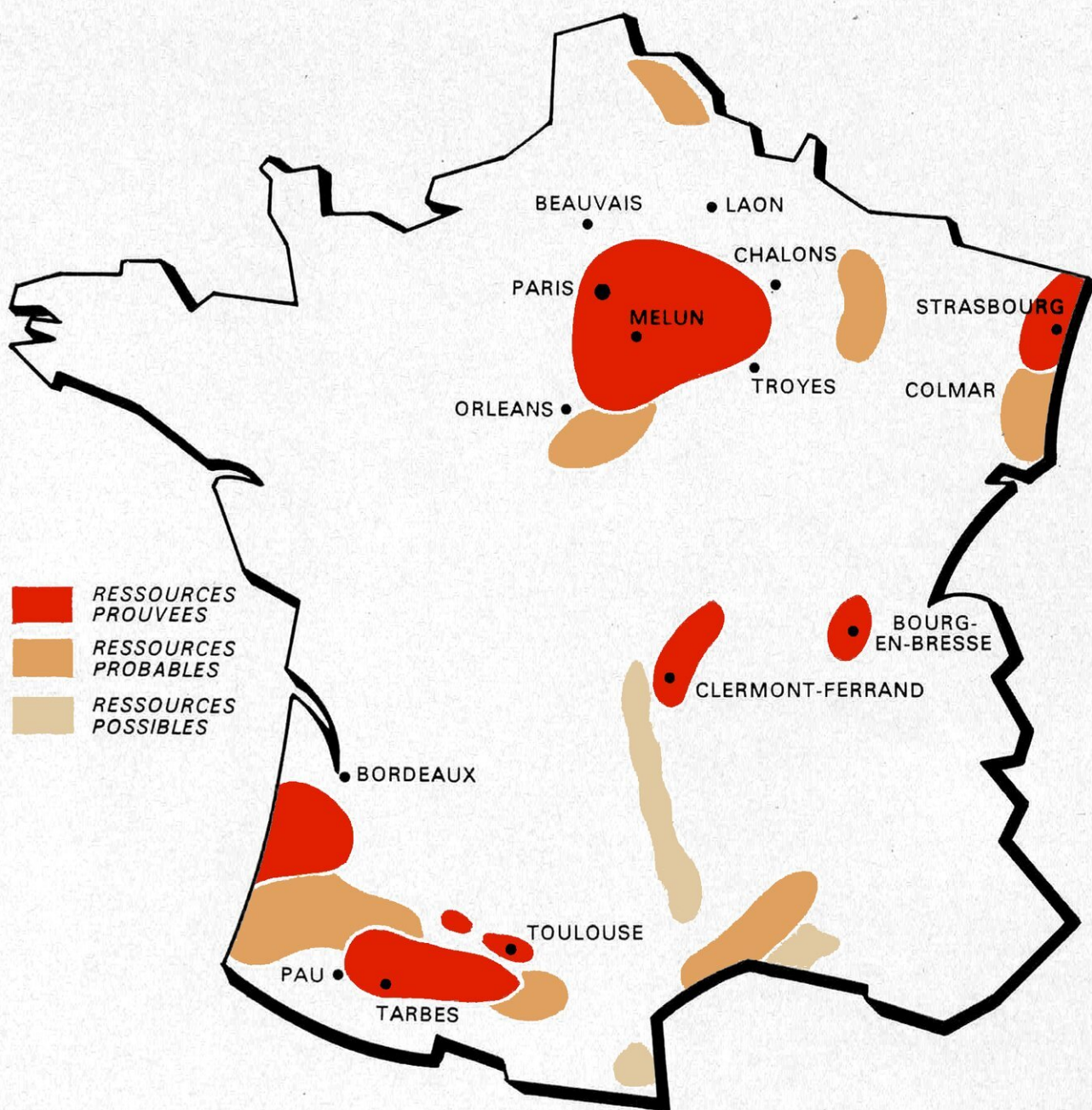
Pourtant, peu de chose a été fait encore en France pour utiliser l'énergie géothermique. On peut citer une piscine à Blagnac (près de Toulouse) et surtout les 3 300 logements chauffés à l'eau thermique dans la Zup de Melun-l'Almont. L'expérience de Melun a été possible grâce à l'eau chaude du Dogger, une couche géologique du Jurassique moyen, selon un procédé mis au point par la Société technique de géothermie. Avant précédé sa réalisation une étude sur modèle mathématique avec la collaboration de l'Institut français du pétrole⁽¹⁾ et l'aide financière du District de Paris.

Dès 1968 cependant, le Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.) a créé un service de géothermie. A partir de 1972, la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (D.G.R.S.T.) a passé des contrats d'études, avec différents instituts ou laboratoires, d'une valeur globale de 750 000 francs en 1972, 1 million de francs en 1973, 2 millions en 1974. Mais toutes ces sommes sont doublées car les

(1) Il faut en effet bien connaître la nappe pour déterminer l'espacement des puits et les débits que l'on peut pomper. Les débits sont plus aisément maintenus si on réinjecte l'eau refroidie à 20 °C. Mais il y a alors risque de refroidissement de la nappe. On a calculé que 100 m³ prélevés à l'heure dans la nappe du Dogger pouvaient suffire au chauffage de 2 000 logements pendant une trentaine d'années à condition que le puits de réinjection (par lequel on réintroduit l'eau dans l'aquifère) soit éloigné d'un kilomètre du puits de prélèvement. Après 30 ans, la température de l'eau parvenant au puits de prélèvement baissera, d'abord peu et lentement, puis très brutalement et très rapidement. Il faut donc compter un amortissement des installations en 30 ans. Le forage d'un puits à 1 800 mètres de profondeur coûte 2 millions de francs, auxquels il faut ajouter la même somme pour le puits de réinjection, plus l'argent nécessaire aux pompes, aux échangeurs, etc.

Notons, en outre que les installations de chauffage domestique marchant à l'eau chaude naturelle (directement ou indirectement) doivent être surdimensionnées par rapport à celles de chauffage à chaudières, en raison de la température jamais très élevée des eaux chaudes naturelles.





Le développement en France, de la géothermie passe par un recensement des régions favorables.

bénéficiaires mettent, dans ces études, des sommes égales à celles qu'ils reçoivent de la D.G.R.S.T.

Enfin, le Ministère de l'industrie et de la recherche a décidé, au mois d'octobre 1974, de favoriser le développement de la géothermie en attribuant à celui-ci un premier crédit de sept millions de francs. Le ministre a annoncé la création d'un comité qui examinera très rapidement, cas par cas, les projets ou avant-projets de géothermie qui lui seraient soumis. Quant au crédit de 7 millions, il serait utilisé pour consentir une aide aux promoteurs choisissant le chauffage par géothermie. Celle-ci serait modulée selon le risque couru.

Pour les régions dont la géologie est bien

connue, un prêt de l'état couvrirait 20 % du coût du premier puits. Si le forage rencontre l'aquifère cherché, le promoteur payerait le forage du deuxième puits (de réinjection) et rembourserait l'Etat. Si le premier puits était « sec » (au moins en eau chaude utilisable), l'Etat ne se ferait pas rembourser le prêt consenti et assumerait donc la perte.

Pour les régions dont la géologie est assez mal connue, le prêt de l'Etat pourrait couvrir 40 ou 50 % du coût du premier forage.

Si cette impulsion est couronnée de succès, la géothermie pourrait faire économiser à la France, vers 1985, 1 à 2 millions de tonnes de fuel.

Yvonne REBEYROL

DES CALORIES AUX KILO- WATTS... SANS INTER- MÉDIAIRE

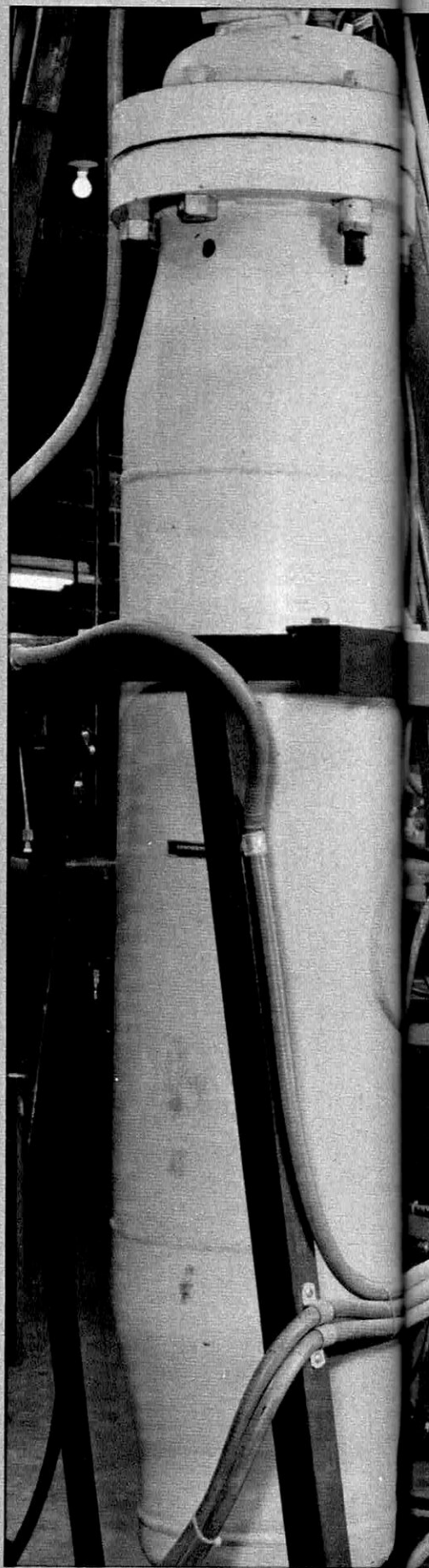
Magnétohydrodynamique : voici sans doute un mot bien compliqué comme les physiciens aiment à en forger, mais dont l'habit barbare recouvre tout à la fois une science jeune et, à travers elle, le moyen de fabriquer directement de l'électricité à partir de la chaleur. Une solution donc bienvenue en ces temps de vaches maigres du potentiel énergétique. Technique prometteuse, car, pour tout dire, elle vient de déboucher sur une première réalisation concrète : l'installation, près de l'aéroport Sheremetyevo de Moscou, d'une centrale industrielle d'une puissance de 25 MW (ou 25 000 kilowatts électriques).

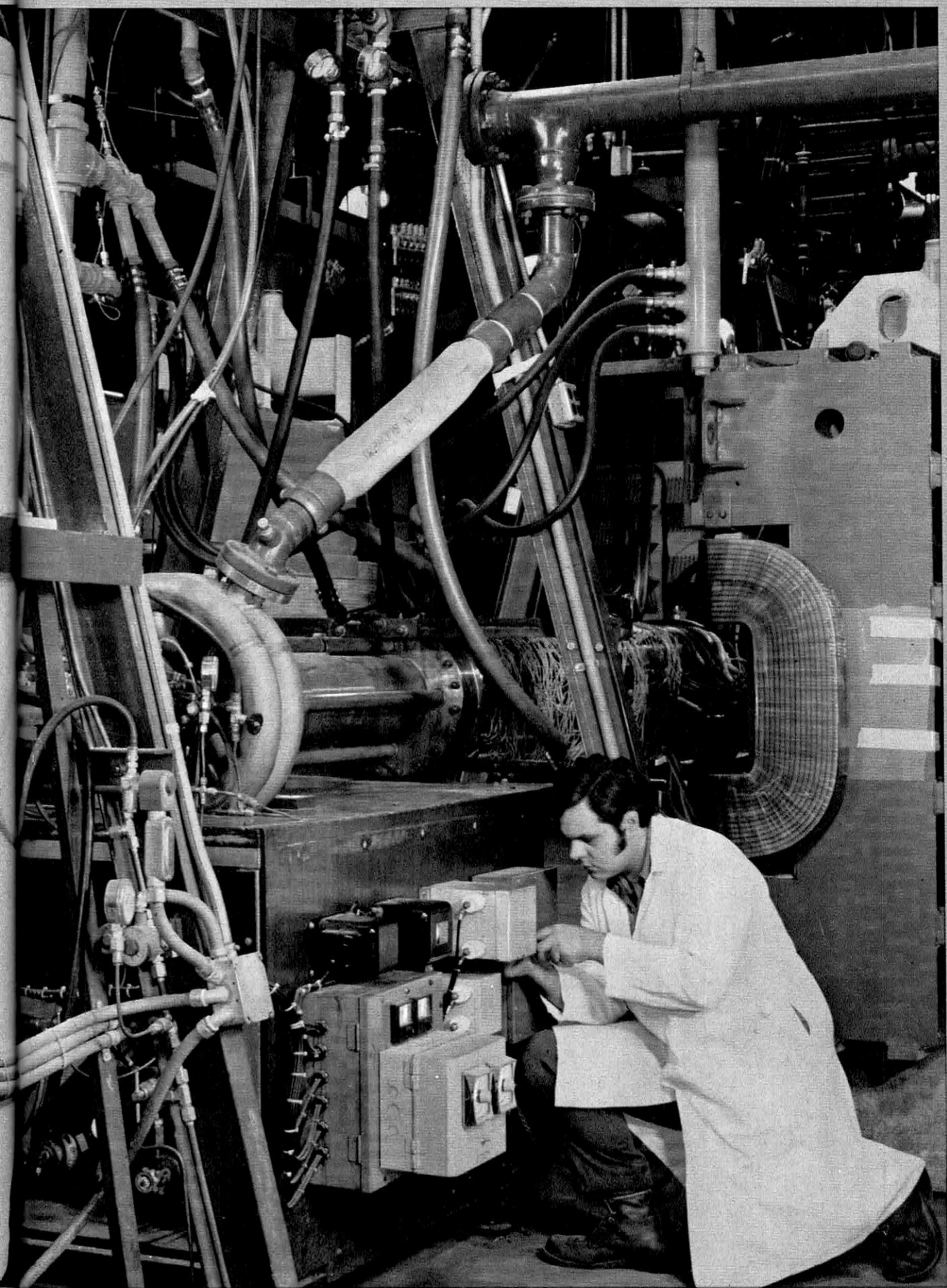
Il suffit, cependant, de décomposer les pièces de l'habit de fête pour que les choses s'éclairent. Magnéto s'accorde évidemment à tous les phénomènes de magnétisme. Hydro concerne l'eau, bien sûr, mais également tous les fluides. L'hydrodynamique s'applique donc à l'écoulement des fluides ou au mouvement des gaz,

comme c'est le cas ici. Assemblons notre trois pièces : la magnétohydrodynamique (ou MDH pour les initiés) sera donc la science qui étudie les fluides électrisés en mouvement dans un champ magnétique.

Dans son principe, la MHD est contemporaine de la découverte — plus que centenaire — des lois de l'électromagnétisme avec, pour corollaire, l'invention de la dynamo. Après tout, une machine MHD n'est rien d'autre qu'une dynamo, mais dont le rotor, au lieu d'être un conducteur solide, serait un fluide et, dans ce cas précis, un gaz.

Faraday lui-même y avait bien songé, à l'origine, en tentant de recueillir quelques millivolts d'une tension induite tout naturellement par le mouvement des eaux (salées et polluées à souhait) de la Tamise dans le champ magnétique de la Terre. Expérience géniale mais sans suite à l'époque. Mais le concept demeurerait que toute forme d'énergie nécessaire pour déplacer un conducteur (dont la nature importait peu), pouvait, par le jeu des phénomènes d'induction, être convertie en énergie électrique. La MHD débouche ainsi sur une application directe de la loi formulée par Faraday en 1840, à savoir que lorsqu'un corps conducteur se déplace dans un champ magnétique, une différence de potentiel apparaît entre ses extrémités. A ceci près, toutefois, que pour qu'un gaz soit conducteur, il doit être ionisé, et que dans ces conditions, il crée lui-même un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique initial. On imagine les difficultés de la théorie que le suédois Hannes Alfvén (Prix nobel de physique en 1970 avec le français Louis





Neel) eut le mérite d'exposer dans les années 50.

Une conversion directe des calories

Pour le physicien, la MHD représente l'une des plus élégantes solutions de transformation de l'énergie. Jusqu'alors, pour obtenir de l'électricité à partir de l'énergie thermique, il fallait utiliser deux stades mécaniques intermédiaires : l'entraînement d'une turbine par l'expansion des gaz chauds ; l'entraînement d'un rotor par la turbine.

Dans le cas d'une machine MHD, on chauffe le fluide pour l'ioniser et on le met en mouvement dans une tuyère. On recueille alors directement sur deux électrodes le courant créé à l'intérieur du fluide. Plus de pièces mécaniques mobiles, plus de cascades de transformations d'énergies. Ce qui promet, théoriquement, un rendement thermodynamique optimum, de l'ordre de 80 à 90 %, alors qu'une installation conventionnelle avec turbine à gaz ne dépasse qu'exceptionnellement 40 %.

Autre avantage : le fluide peut être son propre combustible.

Voilà de bonnes raisons pour justifier l'effort de recherche poursuivi depuis plus de 15 ans et les milliards de francs lourds investis par les Américains, les Russes, les Japonais ou les Français.

En pure perte, souvent, car la MHD exige, en revanche, une technologie d'avant-garde mettant à rude épreuve ceux qui ont à charge de fabriquer des matériaux capables de « tenir le coup » dans des conditions physiques extrêmes.

Quatre conditions

La première condition de fonctionnement d'une machine MHD est la présence d'un fluide suffisamment conducteur. On sait très bien, en théorie, comment y parvenir. Il suffit (comme c'est simple...) de provoquer, par échauffement, une telle agitation des atomes ou des molécules de gaz que, sous l'effet des collisions, des électrons soient arrachés du « cortège électronique » entourant les noyaux. L'atome qui a été ainsi

privé d'un ou de plusieurs électrons devient chargé électriquement. On dit du gaz qu'il est « ionisé » et on l'appelle un « plasma ».

Or, pour qu'un gaz soit suffisamment conducteur, il doit être suffisamment ionisé. Suf-
famment, en termes de physique, signifie la présence minimale d'un atome ionisé sur mille, ce qui confère au fluide une conductivité environ un million de fois moindre que celle du cuivre. Mais, pratiquement, la condition est nécessaire et suffisante.

Pour atteindre cette conductivité, il faut des températures de l'ordre de 3 500 °K. Ce qui conduit à la résolution des quatre problèmes suivants :

- Comment atteindre une température de cet ordre ?
- Comment fabriquer des tuyères pouvant « tenir » à ces températures ?
- Comment réaliser des électrodes qui ne se disloquent pas ?
- Comment, enfin, obtenir les puissantes installations de champ magnétique requises par le procédé ?

Pour récolter il faut semer

Au départ, le problème n° 1 apparaît insoluble. En utilisant comme combustibles ceux qui possèdent le plus haut pouvoir calorifique, c'est-à-dire les hydrocarbures, et comme comburant l'oxygène, les températures atteintes ne peuvent que difficilement dépasser 3 000 °K, soit une température qui ne permet pas une ionisation assez poussée.

Mais les physiciens ne se découragent jamais. Ils ont ainsi découvert un artifice qui a permis de poursuivre les recherches : leur astuce, c'est « l'ensemencement ».

Certaines substances telles que les métaux alcalins — césium, potassium, sodium — sont facilement ionisables à 2 500 °K seulement. Ne comportant qu'un seul électron isolé sur la couche externe, les atomes de césium, par exemple, n'ont besoin que d'un apport d'énergie relativement faible pour être privés de cet électron.

En incorporant aux gaz chauds une petite quantité de telles substances, on «ensemence» les gaz de combustion. Si bien que, vers 2 500 °K, on a de nombreux électrons libres et l'augmentation de la fréquence des collisions entre les électrons libres et les particules du gaz permet de faire croître rapidement le pourcentage d'ionisation.

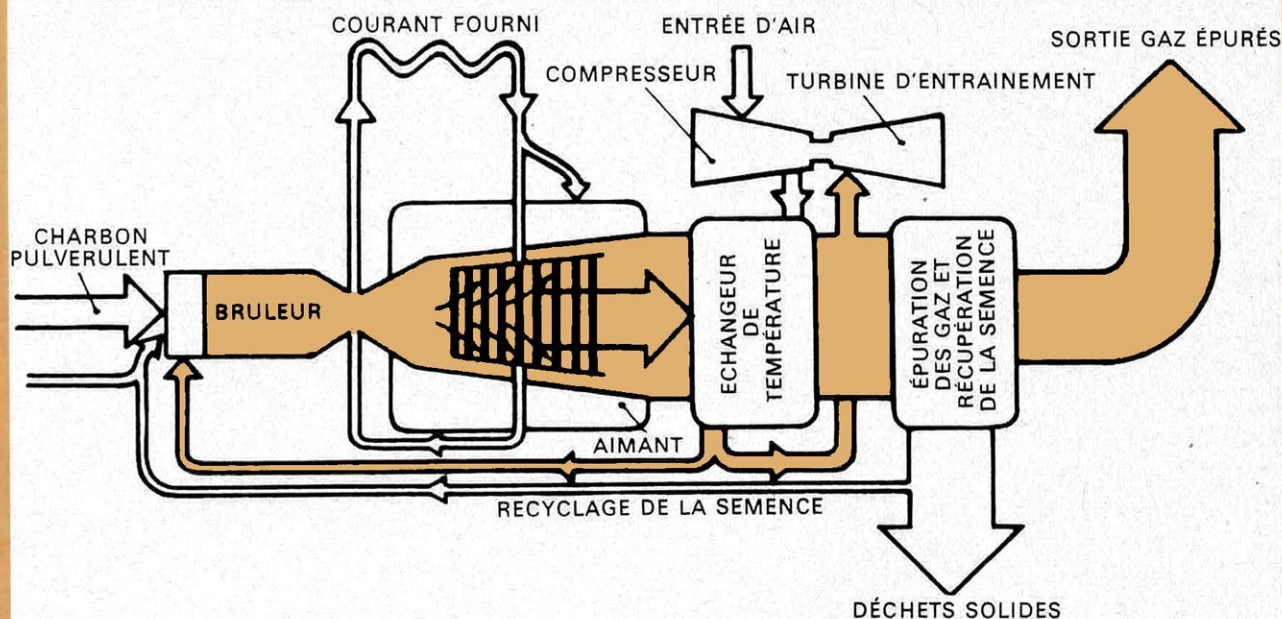
Ainsi, dans le générateur MHD U-25 mis au point par les Russes, la chambre de combustion, fonctionnant à la température de 2 550 °C (soit environ 2 300 °K) est alimentée par 40 % d'oxygène et 60 % de gaz naturel, l'ensemencement étant réalisé par un amalgame mercure-césium.

Quant à l'élément essentiel d'une machine MHD, une tuyère crachant un gaz corrosif et érosif défilant le long des parois à vitesse supersonique, il a fallu, là aussi, inventer des matériaux nouveaux résistant aux chocs thermiques, de faible conductivité aux hautes températures, et de grande tenue mécanique. On a ainsi réalisé des parois de céramiques frittées à partir d'oxydes métalliques tels que l'alumine ou la zircone.

Pour donner une idée des difficultés technologiques qu'il a fallu surmonter, notons qu'en 1959 les revêtements utilisés ne « tenaient » qu'une minute et partaient en éclats. En 1962, on atteint la demi-heure, puis 50 heures en 1962, 100 heures en 1965, pour obtenir, finalement, en 1975 des matériaux « opérationnels » dont on ne connaît pas encore exactement la durée de vie. Même problème pour les électrodes qui, selon le professeur Latychev, de Moscou, « se volatilisaient en trente secondes sur le premier générateur construit en Union soviétique ».

Aujourd'hui, Russes et Américains qui, d'après la revue américaine « Aviation Week », auraient un programme de coopération ayant notamment porté sur la réalisation de la partie « tuyère » du générateur russe, font appel à des électrodes au chromite de lanthane constituant une céramique conductrice, et qui paraît donner entière satisfaction.

Enfin, les techniques actuellement maîtrisées de la supra-



conduction ont permis de créer les champs magnétiques nécessaires, à la fois intenses et de faible coût en énergie électrique. Leurs bobinages (à base de niobium et de zirconium) ne tiennent que peu de place et sont relativement légers.

Les grandes batailles de demain

Toutes les nations ont étudié la MHD, mais si les Russes sont arrivés les premiers à fabriquer une génératrice MHD, non plus de laboratoire, mais fournissant réellement du courant aux abonnés du réseau de Moscou, c'est peut-être tout simplement parce qu'ils ont choisi une voie négligée par les Occidentaux après leurs premières déceptions. La machine MHD russe est dite à « cycle ouvert » : le gaz brûlé est libéré. Or, Américains et Français avaient misé sur la réalisation de génératrices à « cycle fermé », le fluide resservant constamment, sans sortir de la boucle.

La solution était intéressante en ce sens que les calories devaient être fournies par des piles atomiques. Mais comme les températures atteintes ne dépassaient pas 1 500 °C, on dut faire appel à des gaz rares véhiculant la vapeur de césium et travaillant à une pression relativement basse, ces gaz rares (tels que l'argon) étant

facilement mis en mouvement. On pouvait alors obtenir une ionisation non thermique, comparable à celle qui se produit dans un simple tube au néon. Malheureusement, cette solution n'apporta que des déboires par suite de l'apparition dans les générateurs d'essais d'une instabilité électrothermique s'accompagnant d'une chute brutale du rendement. Dès lors, un mouvement de découragement s'amorça un peu partout.

Néanmoins, de nombreuses recherches sont effectuées dans le monde.

Aux Etats-Unis, la firme AVCO peut être considérée comme le pionnier de la recherche dans ce domaine. En 1959, elle réalise un prototype dit MK1, fournissant 10 kW pendant 10 secondes. Il est suivi par MK2 en 1962 (1,5 kW pendant 10 secondes), MK5 en 1965 (32 kW pendant 60 secondes de fonctionnement), Lhoro en 1966 (18 kW, 60 secondes), puis MK4 en 1966 (2 kW, 2 heures), et MK6 en 1973 qui a fourni 250 kW pendant 100 heures. On remarque le hiatus de 7 années entre MK4 et MK6 où, plus précisément à la bifurcation des recherches de la MHD orientées vers l'énergie nucléaire.

En ce moment, AVCO lance un programme qui devrait

conduire à la mise en œuvre, d'ici 20 ans, d'une usine opérationnelle de type à cycle ouvert de 500 à 1 000 MW de puissance installée.

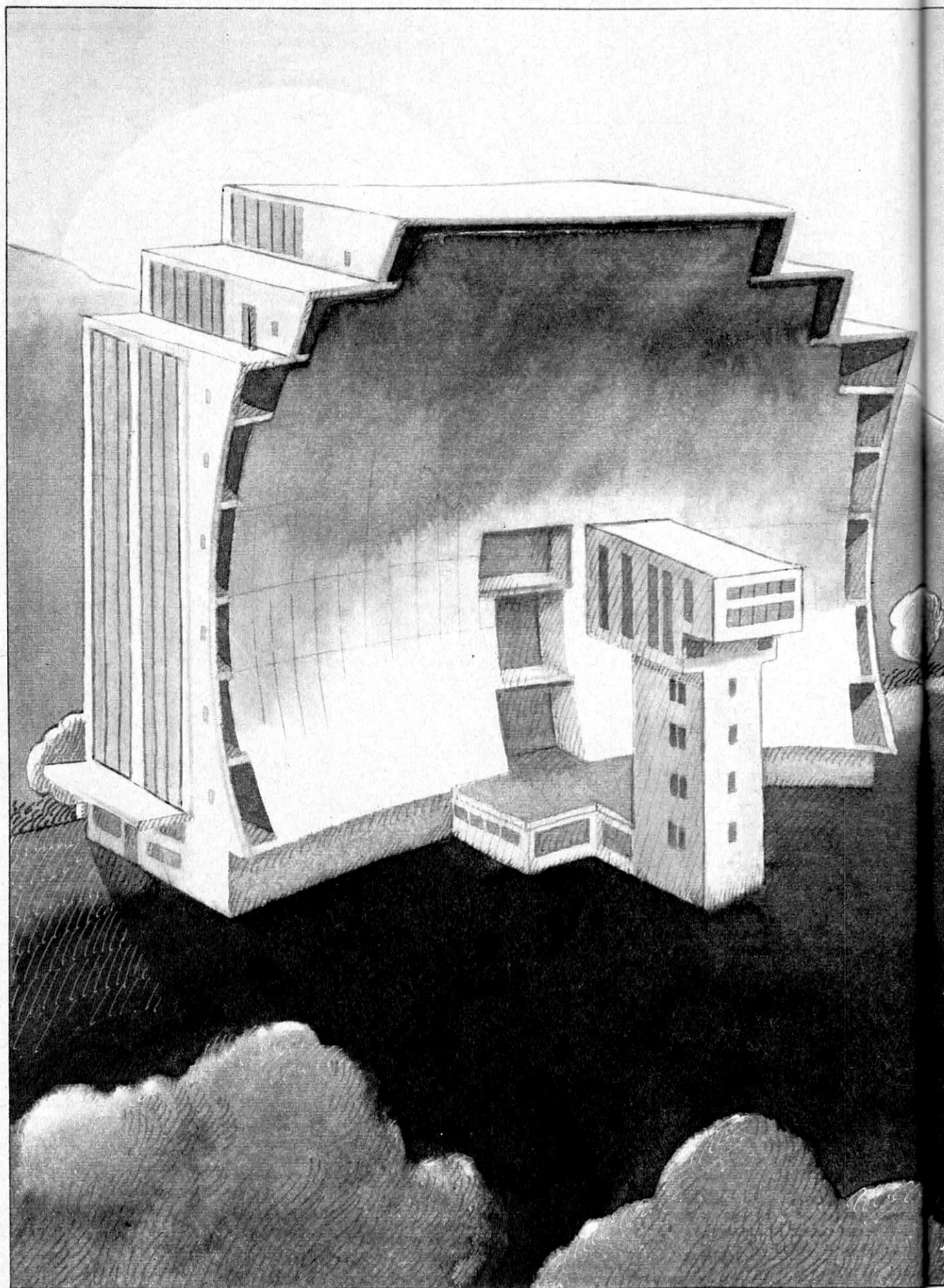
Parallèlement, le bureau de recherches du charbon (Office of coal research) a passé des contrats avec Westinghouse, le M.I.T., l'Université de Tennessee et le Bureau des Mines pour des travaux sur la M.H.D. Il a de même incité l'Air Force à avancer quelque 20 millions de nos francs pour des recherches dans ce domaine.

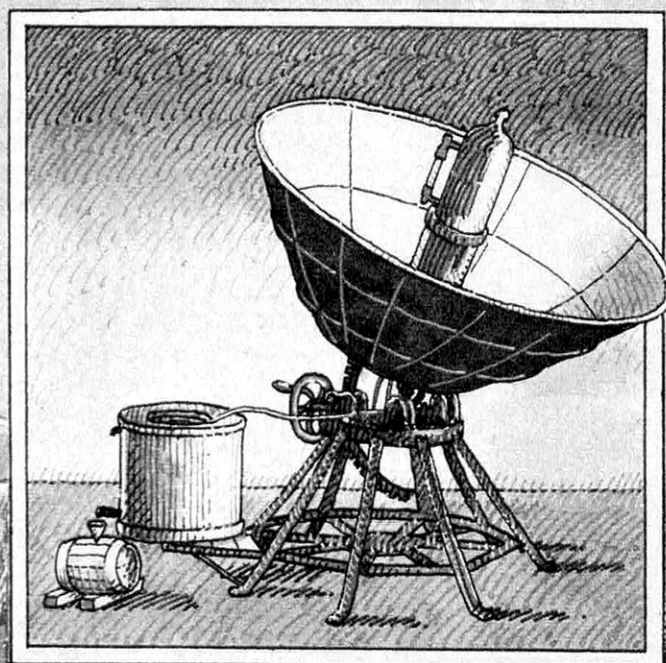
En Grande-Bretagne : le British Central Electricity Generating Board a construit un prototype de 20 MW, mais qui demanderait encore de sérieuses mises au point.

En France : E.D.F., avec le soutien de la DGRST, a poursuivi des études théoriques sur le fonctionnement en cycle fermé d'un mélange de gaz rares dans du sodium liquide, cependant qu'à l'Institut de mécanique des fluides, à Marseille, on s'est longtemps intéressé aux plasmas d'hélium ensemencés au césium, chauffés par pile atomique, puis portés à haute température par pulsations d'ondes de chocs.

Mais il semble, malheureusement, que les recherches ne soient pas toujours poursuivies avec l'enthousiasme... ou les crédits nécessaires.

L. F.

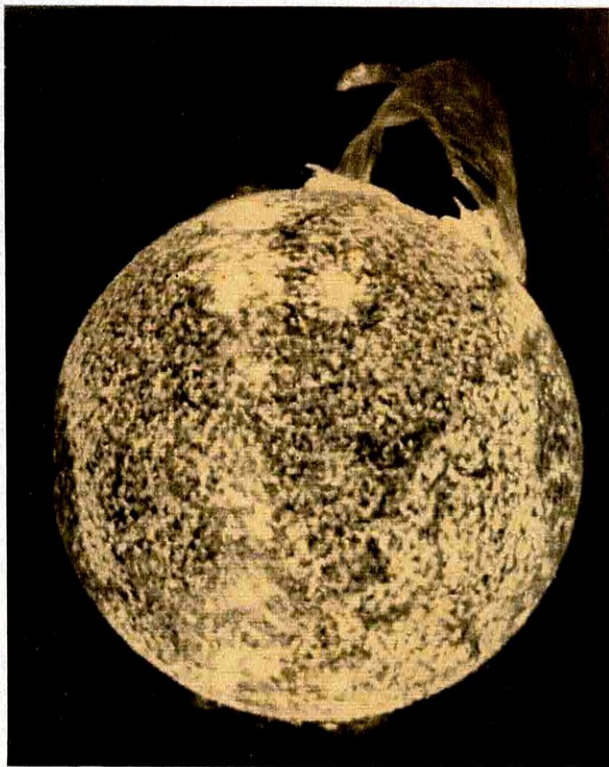




L'ÉNERGIE SOLAIRE

Mettre à profit l'énergie solaire en place des combustibles liquides ou gazeux dont l'utilisation a marqué jusqu'ici le XX^e siècle, conduit en fait à repenser profondément notre civilisation technicienne. Celle-ci s'est développée sous le signe de la concentration. Concentration de la production d'énergie comme de celle des biens manufacturés. Essentiellement diffuse, l'énergie solaire ne saurait alimenter de très grands complexes industriels, ni des centres urbains tentaculaires. C'est au contraire au niveau de l'industrialisation «à la chinoise» et de la dispersion de l'habitat qu'elle jouera son véritable rôle, au moins à court ou moyen terme.

—>



NASA.

● Jadis vénéré par les sociétés primitives, le Soleil est de nos jours considéré comme une source d'énergie indispensable à la vie terrestre. Il est non seulement le régulateur physique et biologique de la biosphère, mais également un facteur déterminant pour l'équilibre psycho-physiologique et les capacités d'expansion de l'espèce. Il y a fort longtemps que l'homme a essayé de tirer parti de cette énergie « gratuite », pour la cuisson et le séchage par exemple.

Pourtant, et paradoxalement, ce n'est que vers les années 50 que la recherche scientifique s'est véritablement attaquée à ce domaine. Et il faut bien le dire, en raison des faibles moyens financiers consacrés aux recherches, celles-ci en sont encore aux premiers stades.

Certes, les expériences spatiales ont beaucoup contribué à faire progresser les techniques d'utilisation de l'énergie solaire, mais sans tenir compte des impératifs économiques qui, sur la Terre, sont loin d'être négligeables.

A la fin du XIX^e siècle, plusieurs possibilités se sont offertes dans le domaine de la production d'énergie et dans celui de son transport. Des choix ont été faits. Ils ont conduit à l'impasse actuelle. De nos jours, d'immenses réseaux distribuent une énergie produite presque exclusivement à partir de systèmes concentrés à grande échelle, utilisant les combustibles gazeux, liquides, solides ou, en moindre proportion, l'énergie hydraulique. Dans les pays industrialisés, cette notion de réseau intégré, alimenté par des centrales de haute puissance, était liée à celle de croissance et de développement. C'est pourquoi ont été négligées les unités de

production de faible puissance à partir des énergies dites « gratuites ».

Il y a près de deux ans, ces choix ont été critiqués dans le rapport du M.I.T. et dans le rapport Mansholt, qui dénonçaient la dégradation du milieu de vie, le gaspillage des ressources naturelles et mettaient en valeur les énergies « non polluantes ».

La crise actuelle rend encore plus aigu le besoin de diversification des sources d'énergie. La volonté générale d'arrêter le gaspillage, les besoins énergétiques des pays sous-développés non producteurs de pétrole, les soucis de protection de l'environnement que cette crise ne doit pas chasser, tout cela explique le regain d'intérêt pour le « solaire ».

Six cents chercheurs réunis à Paris en juillet 1973 sous l'égide de l'Unesco, pour le congrès « Le Soleil au service de l'homme », étaient unanimes à inciter les gouvernements à accorder aux recherches et développements des moyens financiers suffisants.

Quelle disproportion, en effet, entre l'importance de l'énergie diffusée à la surface du globe et l'insignifiance des moyens mis en œuvre jusqu'ici pour la capter et l'utiliser !

Le soleil, que l'astronomie « spatiale » nous permet au



Un kilowatt par mètre carré

L'énergie que reçoit la Terre en provenance du Soleil est considérable. Elle représente une puissance de 180 000 milliards de kilowatts, soit environ 1 kilowatt par mètre carré. Cela veut dire que tous les besoins énergétiques des Etats-Unis en l'an 2000 correspondent à l'énergie solaire reçue par moins de 1 % de leur territoire. Cela veut dire également que notre pays reçoit chaque année une énergie représentant mille fois celle que produira l'EDF en l'an 2000.

Considérable donc, et non polluante, telle est l'énergie reçue du Soleil, puisque sa conversion n'engendre aucun sous-produit, pas même une « pollution thermique » inévitable dans les autres méthodes de production à partir des combustibles fossiles.

Malheureusement, l'énergie lumineuse, si généreusement distribuée, possède deux gros défauts : elle est intermittente et elle est « diluée ». Le Soleil ne brille en effet nulle part en permanence. L'alternance des jours et des nuits, le balancement saisonnier, la nébulosité, sont autant de handicaps pour son utilisation.

D'autre part, à raison de 1 kW au m², il fau-

drait théoriquement pouvoir récupérer l'énergie reçue par une surface ensoleillée de 1 km² pour disposer d'une puissance de 1 million de kW, celle fournie par les centrales nucléaires actuelles.

En fait, à cause des nuits, des nuages, de l'éclaircissement oblique, c'est seulement le 1/16^e de cette énergie que l'on récupère. Soit donc, pour obtenir le million de kW, une surface de six km².

Et si l'on désire transformer cette énergie en électricité, sachant que le rendement de transformation est actuellement voisin de 10 %, on arrive à une surface de 60 km², ce qui est énorme.

Se posent donc de nombreux problèmes technologiques pour concevoir des installations très étendues capables de collecter la lumière du Soleil, pour stocker l'énergie reçue, pour la convertir. Mais l'on peut faire plusieurs remarques. Tout d'abord, il n'y a pas de problème technique rigoureusement insoluble. Le seul problème est d'accorder à la recherche et au développement les moyens financiers suffisants pour qu'ils puissent effectivement « déboucher ». Et jusqu'à présent, peu de moyens ont été consacrés à l'énergie solaire. En 1973, les Etats-Unis ont dépensé 350 millions de dollars pour le nucléaire,

aujourd'hui de mieux connaître, n'est encore guère utilisé de façon rationnelle à la surface de la terre.



et quatre seulement pour l'énergie solaire !

Une seconde remarque s'impose : de la dispersion de l'énergie solaire peut découler, en fait, un gros avantage. Pour en prendre conscience, il faut se débarrasser de certaines habitudes de pensée. On a longtemps invoqué, et l'on invoque encore en matière énergétique, des arguments économiques et techniques pour consacrer « l'économie d'échelle », c'est-à-dire la supériorité des installations centralisées de forte puissance nécessitant un réseau complexe de distribution et de transport sur les unités plus modestes.

De multiples applications

Mais pourquoi viser d'emblée la production d'électricité solaire à partir de centrales comparables aux actuelles ? De nombreux spécialistes pensent qu'en matière solaire, les « économies d'échelle » ne joueront guère. C'est-à-dire qu'une petite centrale ne sera pas moins efficace qu'une grosse. La vocation de l'énergie solaire, déjà dispersée, n'est-elle pas plutôt une utilisation sur place (du moins dans un premier stade) ?

Il existe déjà des expériences, voire des réalisations opérationnelles, non seulement dans des pays au climat plus chaud que le nôtre, mais sous nos latitudes : cuisson des aliments ; chauffage de l'eau et des habitations ; climatisation ; pompage de l'eau ; dessalement de l'eau de mer ; production d'électricité...

Nous entrons certainement dans une période où l'énergie solaire ne sera plus seulement envisagée par quelques enthousiastes. Son potentiel commence à être reconnu au plus haut niveau dans les pays industrialisés. Ainsi, en mars 1973, un rapport publié par la NASA et la US National Science Foundation définissait les étapes permettant à cette énergie de devenir en une cinquantaine d'années l'une des principales.

Dans ce programme, la conversion directe en électricité ne reçoit pas un degré de priorité élevé. En fait, les experts estiment qu'à la fin du siècle, le « solaire » pourrait assurer 35 % du chauffage et de la climatisation des immeubles, 30 % de l'approvisionnement en gaz (production de combustibles « propres » à partir de déchets organiques) et, vers l'an 2020, 20 % de la production de courant électrique.

Énergie solaire et habitation

C'est dans le domaine de l'habitat qu'existe le plus grand nombre d'applications actuelles. En Nouvelle-Guinée, en Inde, des installations utilisent l'énergie solaire pour chauffer de l'eau. En Australie, de nombreuses maisons, des bâtiments publics, (écoles, hôpitaux) sont équipés de chauffe-eau placés sur le toit, complétés par un appoint électrique pour les périodes sans Soleil. Au Japon, plus de deux millions d'habitants se servent de tels chauffe-eau ou utilisent un chauffage domestique à base d'énergie solaire.

La consommation d'énergie pour les besoins

domestiques est considérable et très souvent dispersée. En conséquence, et du fait de la concentration des centrales, les énergies sont grevées de frais de transport et de distribution. Il n'en serait pas de même pour l'énergie solaire si elle est utilisée au voisinage immédiat de son lieu de captation.

Dans de telles installations, la production de chaleur repose sur un principe fort simple, celui des serres. Les radiations se situant dans des longueurs d'ondes visibles et du proche infrarouge (entre 0,3 et 3 microns) sont arrêtées par une surface absorbante, plaque de métal peinte en noir par exemple (l'idéal est le « corps noir » des physiciens), qui à son tour rayonne. Mais les radiations réémises sont situées dans un autre domaine : celui de l'infrarouge lointain (entre 4 et 30 microns). Ce rayonnement est arrêté si l'on place au-dessus de la plaque absorbante une surface transparente en verre.

Ainsi, une plaque de métal noirci recouverte d'une vitre peut atteindre des températures voisines de 200 °C. Il est donc possible de chauffer de l'eau jusqu'à 60 ou 80 °C.

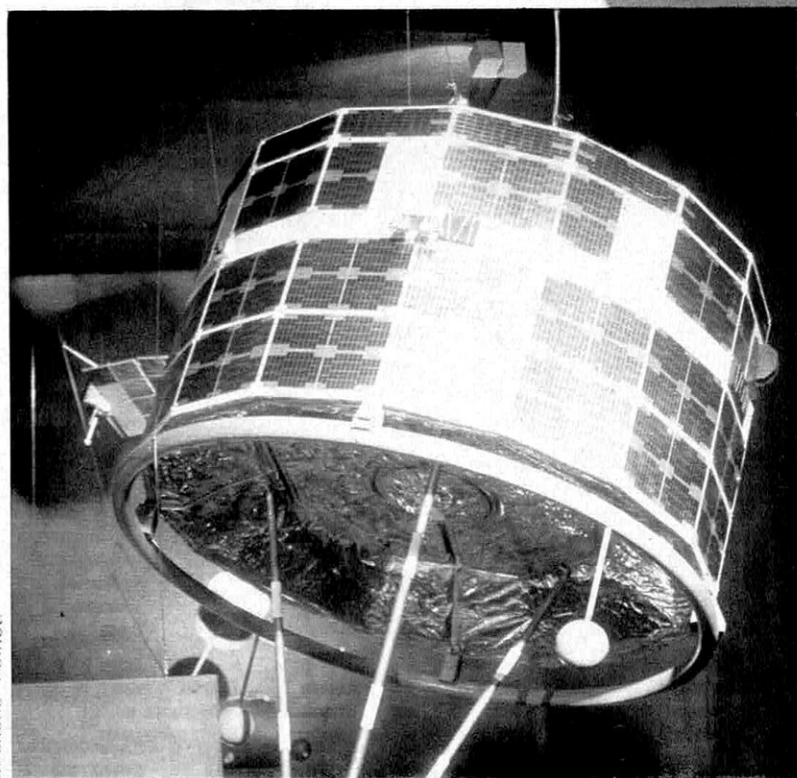
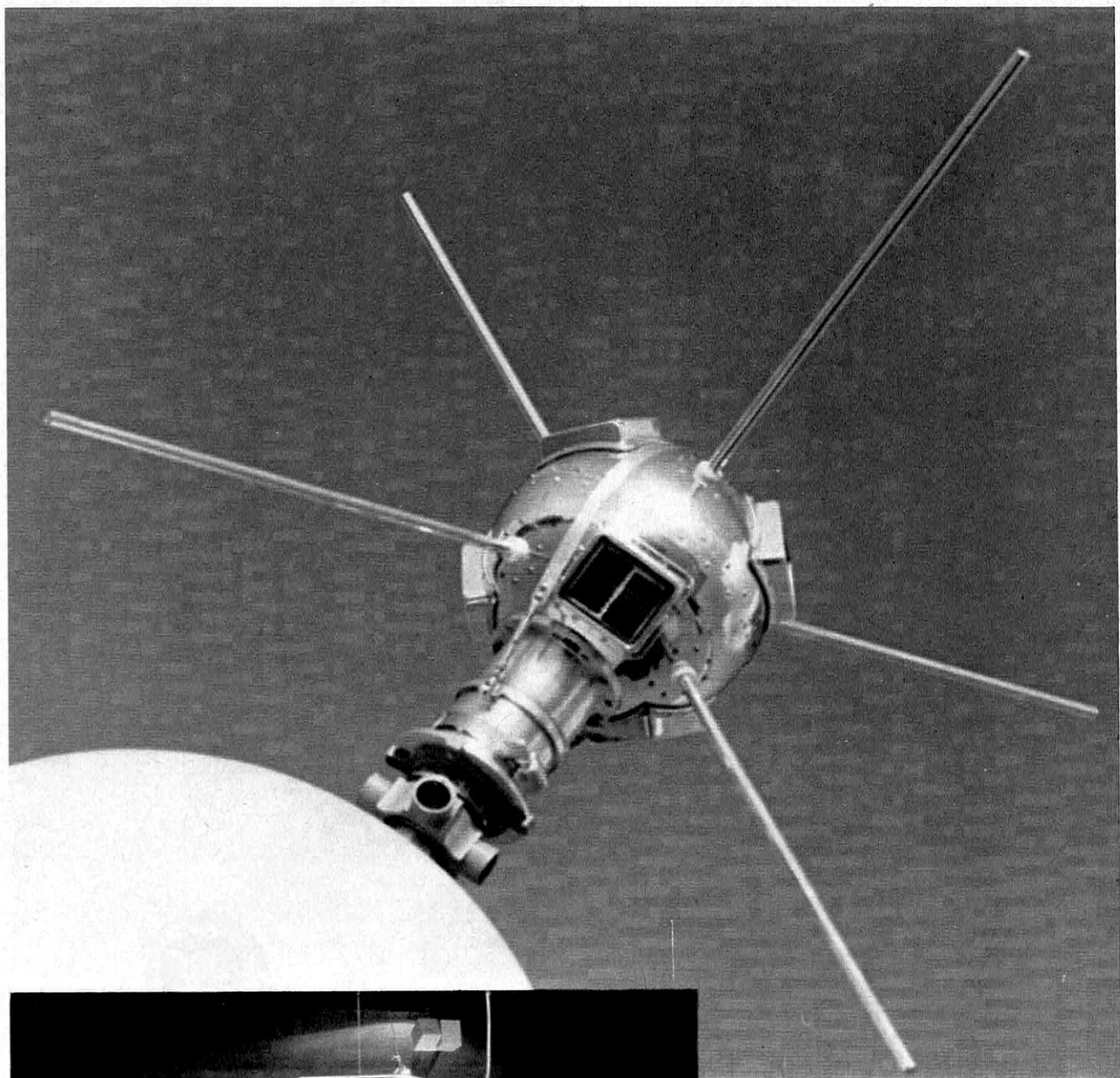
Dans les pays où ils se sont répandus, il existe une grande variété de chauffe-eau solaires, du plus simple au plus complexe, car de nombreuses améliorations techniques sont possibles. Un second vitrage, interposé à 1 ou 2 cm en avant du premier, permet par exemple de réduire les pertes par rayonnement. Des revêtements sélectifs ont été mis au point pour absorber un maximum de radiations solaires tout en n'émettant qu'un très faible rayonnement. On peut également concentrer la lumière en disposant des miroirs réfléchissant les rayons. Mais ces miroirs doivent être orientés face au Soleil.

Pour pallier cet inconvénient, on a recours à des capteurs « tous azimuts », réflecteurs cylindro-paraboliques orientés Est-Ouest qui donnent, non plus un foyer ponctuel, mais une « ligne focale ». Ce dispositif se prête particulièrement bien au chauffage d'un fluide circulant dans une canalisation.

Les systèmes à l'étude actuellement en France au CNRS et à la COMPLES à Marseille sont intéressants, car ils utilisent des systèmes statiques, se passant au maximum du matériel électromécanique compliqué utilisé dans d'autres installations.

Le CNRS a entrepris des recherches dès 1956 au Laboratoire d'énergie solaire d'Odeillo-Font-Romeu dirigé par le professeur Trombe. Les premières maisons solaires y furent construites pour abriter les ingénieurs travaillant sur le grand four d'Odeillo, et une maison solaire fut présentée à la Foire de Paris en 1973. Les dispositifs sont aussi simples que possible, car ils ont été conçus dans une perspective de démonstration.

La chaleur solaire est enfermée entre la surface proprement dite de l'habitation, en béton rugueux, et deux parois de verre. Le verre est implanté sur les façades verticales Sud, et le



Michelle Poinot

La technique des cellules photovoltaïques ou, comme on dit couramment, des cellules solaires, s'est vraiment développée avec l'épopée spatiale. Elle fut introduite dès 1958, à bord du petit satellite américain Vanguard 1 (en haut). Elle s'est depuis étendue à une foule d'engins spatiaux américains, soviétiques ou autres, en particulier pour les vols non habités. Mais les vaisseaux Soyouz, Saliout ou Skylab ont été équipés aussi de panneaux solaires. Notons que si les unités (non orientables) de Vanguard 1 ne délivraient que 50 mW de puissance, Skylab disposait de quelque 6 kW. Le rendement des meilleures cellules solaires actuelles ne dépasse guère encore 10%, mais la source d'énergie est évidemment gratuite.

fluide caloporteur est l'air qui circule en permanence derrière le vitrage grâce à des ouvertures convenablement placées. Ainsi un mur de béton de 35 cm d'épaisseur permet d'obtenir un courant d'air chaud jusqu'aux premières heures du matin. Toutefois, pour conserver à toute heure une température constante ou pour les périodes où l'ensoleillement est faible ou nul, un chauffage d'appoint est prévu. Les économies sont appréciables, puisque le chauffage solaire peut fournir les 2/3 ou les 3/4 des calories totales.

Aux Etats-Unis, une vingtaine de maisons ont été construites en divers endroits pour capter le rayonnement solaire. Certaines sont équipées de dispositifs de stockage. Ainsi, dans la maison Thomson à Washington, c'est l'eau qui sert de fluide caloporteur. Cette eau est élevée par des pompes jusqu'au haut de la maison. Elle s'échauffe en descendant le long du toit et de la façade, au contact des systèmes absorbants. Cette eau va s'accumuler dans une citerne au sous-sol, entourée de pierres qui récupèrent les calories perdues. L'air soufflé par un système de ventilation, et chauffé au contact de ces pierres, répand la chaleur dans toute l'habitation.

Toutes les études économiques montrent que le chauffage solaire est déjà compétitif par rapport au chauffage à l'électricité. Gros avantage supplémentaire, il n'entraîne aucune pollution.

Refroidir par le soleil

Mais le grand intérêt de l'énergie solaire pour le conditionnement des habitations réside dans la possibilité d'être utilisée pour le rafraîchissement des pièces pendant les périodes chaudes.

Les collecteurs d'énergie solaire peuvent en fait être combinés à un système de conservation de la chaleur pour assurer le chauffage en hiver et l'apport d'air frais en été, une source auxiliaire d'énergie fournissant la chaleur en l'absence d'ensoleillement. Ainsi les collecteurs s'adaptent bien aux régions désertiques où les nuits sont particulièrement froides : le toit des maisons portant une réserve d'eau est protégé du rayonnement pendant la journée par des panneaux isolant mobiles. L'isolation est supprimée la nuit afin d'abaisser la température de l'eau et d'assurer un refroidissement le jour suivant.

En Australie, plusieurs maisons utilisent l'eau chaude produite par un collecteur solaire pour alimenter en énergie un système de réfrigération par absorption.

Ces réfrigérateurs solaires emploient un système à cycle intermittent comportant deux réservoirs. Le premier contient une solution d'eau et d'ammoniac qui s'évapore sous la chaleur solaire. Cet ammoniac passe dans le second récipient où se trouve de l'eau froide. Lorsque la première solution s'est complètement appauvrie, l'ammoniac tend à s'évaporer du second pour revenir au premier. Lorsque tout l'ammoniac est repassé dans le premier récipient, il suffit de laisser chauffer à la chaleur solaire et le cycle recom-



mence. Cette réaction est endothermique, elle demande de la chaleur pour se produire, donc elle refroidit le milieu.

De tels réfrigérateurs fonctionnent au Laboratoire français de Mont-Louis et produisent trente tonnes de glace par an. Il en existe en URSS, aux Etats-Unis, au Brésil. Le système de refroidissement solaire fonctionne d'autant mieux que le Soleil brille plus fort.

Il est prévu, aux Etats-Unis, d'équiper 10 % des bâtiments qui seront construits d'ici 1985 de systèmes de conditionnement d'air par énergie solaire.

L'utilisation de l'énergie solaire dans l'habitation ne peut en fait être dissociée d'une conception d'ensemble du bâtiment, du choix dans l'orientation, de l'isolement thermique, de la toiture et des couvertures. Il faudrait peut-être, à cet égard, prendre quelques leçons des architectures dites traditionnelles. L'architecture moderne a en effet complètement oublié de tenir compte de l'importance du climat dans la conception des bâtiments. Un certain nombre d'architectes actuels en ont conscience et se sont manifestés au congrès de l'UNESCO.

Les pompes solaires

La facilité relative avec laquelle l'énergie solaire peut réchauffer un fluide à une tempéra-



ture de l'ordre de 60° à 150 °C a poussé de nombreux chercheurs à réaliser des moteurs utilisant un fluide à basse température d'ébullition. Le rendement de tels moteurs n'étant pas très élevé (puisque la température de la source chaude est relativement faible), leur domaine d'application est surtout les installations de pompage d'eau des nappes souterraines. Les zones arides des pays en voie de développement, riches en soleil et pauvres en eau, sont intéressées au premier chef par ce genre d'équipement.

La première réalisation industrielle du genre fonctionne depuis mai 1973 à Chinguetti en Mauritanie, l'un des pays d'Afrique qui a le plus souffert de la sécheresse récente. Elle a été conçue par les établissements Mengin et par le professeur Masson (ancien doyen de la Faculté des Sciences de Dakar). Auparavant quatre prototypes avaient été installés au Sénégal, au Niger et en Haute-Volta.

La pompe de Chinguetti alimente en eau une collectivité humaine de près de 2 000 habitants et un millier de têtes de bétail. Elle fonctionne sous la seule responsabilité d'un indigène qui assure l'ouverture d'une vanne tous les matins lorsque le soleil chauffe suffisamment.

C'est le toit de l'école qui sert de capteur de l'énergie solaire. Il se compose d'une succession de canaux parallèles dont le fond est constitué

Dans le projet d'habitation Solar One, de l'Université du Delaware, la toiture est garnie de panneaux de cellules solaires au sulfure de cadmium pour la génération de l'électricité domestique. Le chauffage est lui aussi fourni par le soleil.

par un corps absorbant, plaque d'aluminium noirci dans laquelle court une canalisation où circule de l'eau. L'ensemble est placé sous un vitrage et, par effet de serre, l'eau atteint des températures de 60° ou 70°. L'eau ainsi chauffée en circuit fermé est acheminée vers un échangeur dans lequel elle cède ses calories au fluide intermédiaire qui est du butane. Le butane se vaporise en actionnant un moteur à rotation lente qui entraîne une pompe à pistons allant puiser l'eau à 11 m de profondeur.

Ce moteur ne provoque aucun bruit, aucune pollution. La surface recueillant l'énergie solaire couvre 88 m² et la pompe peut fournir 10 m³ par jour d'eau en fonctionnant cinq à six heures. La grande originalité du moteur est qu'il fonctionne sous une faible différence de température, 30° environ entre la source chaude et la source froide, avec de l'eau qui n'est pas portée à ébullition.

L'installation de Chinguetti a coûté 200 000 F. Le mètre cube d'eau pompé revient à près de

1 F. C'est encore cher, mais, en augmentant la surface du collecteur, on peut abaisser ce coût.

De nombreux pays du Tiers-Monde se sont intéressés à cette technique. Ainsi, le Mali, le Tchad, la Haute-Volta, le Mexique. Ce dernier a installé dans un premier temps dix pompes sur son territoire.

L'eau douce « solaire »

Une autre application intéresse en tout premier lieu les pays en voie de développement. C'est la distillation de l'eau de mer ou des eaux saumâtres pour produire de l'eau potable.

Les distillations ont depuis longtemps fait l'objet d'études approfondies portant sur des unités de taille très variée. La plus importante installation du monde est celle de Las Salinas au Chili. Construite il y a une vingtaine d'années, elle couvre 440 000 m², répartis en dix bassins, et fournit 240 m³ d'eau douce par jour.

Le principe de base est toujours le même : l'eau échauffée dans une serre se condense sur la paroi supérieure transparente inclinée, d'où elle s'écoule dans une rigole collectrice. Les eaux ainsi distillées ne possèdent pas le goût désagréable de celles distillées dans les alambics, car le contact entre la vapeur, l'eau condensée et l'air est constant.

Les applications de l'énergie solaire en ce domaine en sont encore au stade de l'usine-pilote. Certains problèmes technologiques se posent, tel celui de l'entretien des circuits.

A l'échelle expérimentale, cependant, plusieurs petites collectivités sont alimentées en eau potable. Il existe ainsi une distillerie-pilote de 600 m³ construite en Turkménie. Celle-ci fournit depuis trois ans, en moyenne, 1, 3 tonne par jour d'eau potable destinée aux troupeaux. La capacité doit être triplée. Mais la solution technique adoptée dans cette usine est relativement complexe (le rayonnement solaire est concentré sur des chaudières au moyen de miroirs paraboliques).

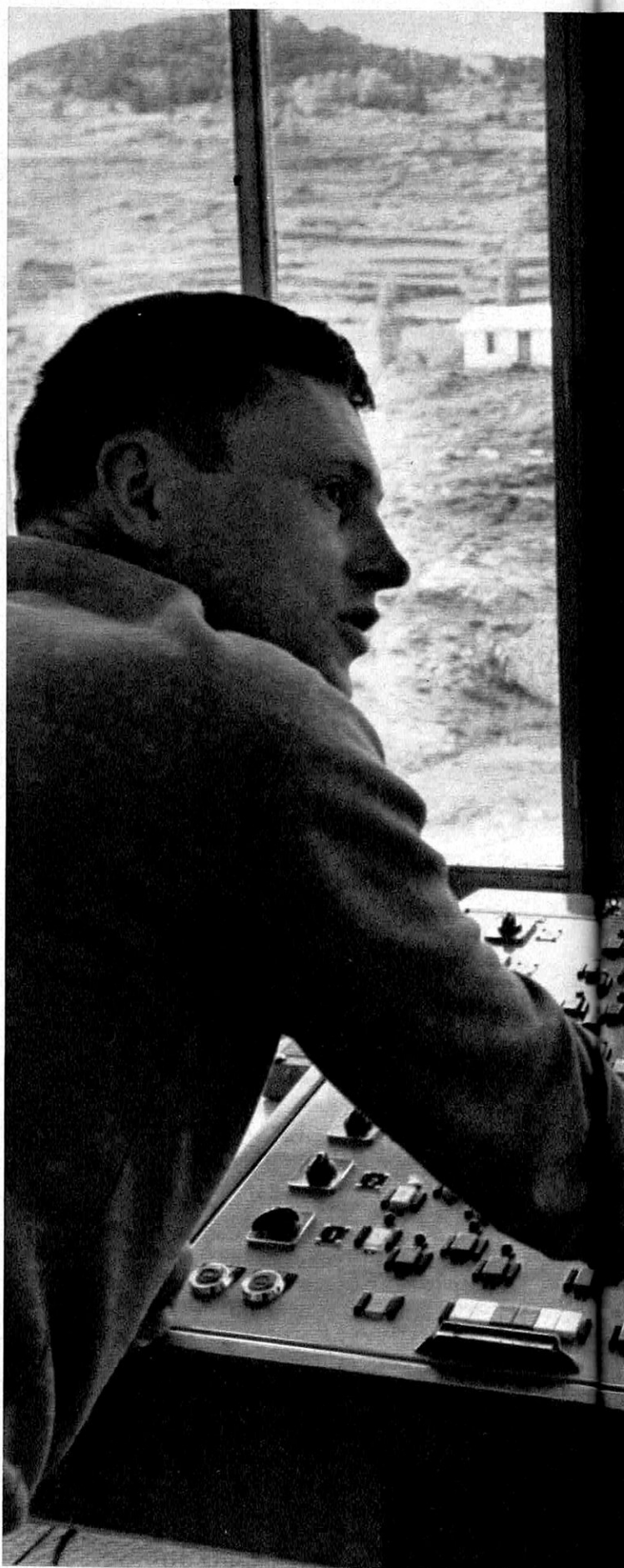
Les cellules photovoltaïques

Si, pour toutes les utilisations domestiques, les systèmes solaires s'avèrent d'ores et déjà compétitifs, il n'en est pas de même, à l'heure actuelle, de la production d'électricité. Deux grandes filières sont envisagées : la filière thermodynamique et la filière photovoltaïque.

Cette dernière, grâce à laquelle le rayonnement solaire est directement transformé en courant continu, a été mis en vedette par les expériences spatiales où des panneaux de photopiles au silicium ont équipé les satellites et autres vaisseaux spatiaux. Mais autant dans le domaine spatial, le coût a peu d'importance, autant dans le « terrestre », il est primordial, et ces techniques sont encore coûteuses. Certaines réalisations existent pourtant.

Au Japon, plusieurs installations sont expérimentées pour alimenter des postes isolés. Dans le département de Nagasaki, un phare automa-

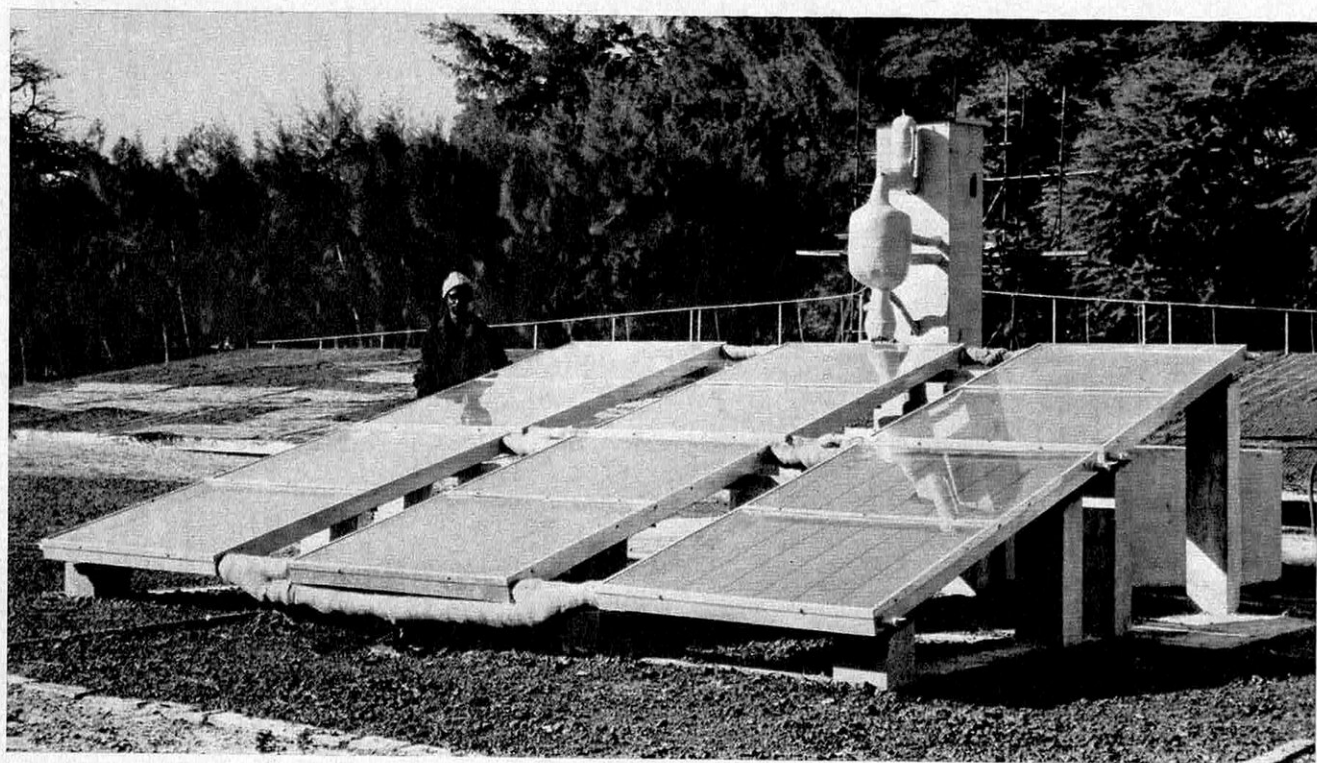
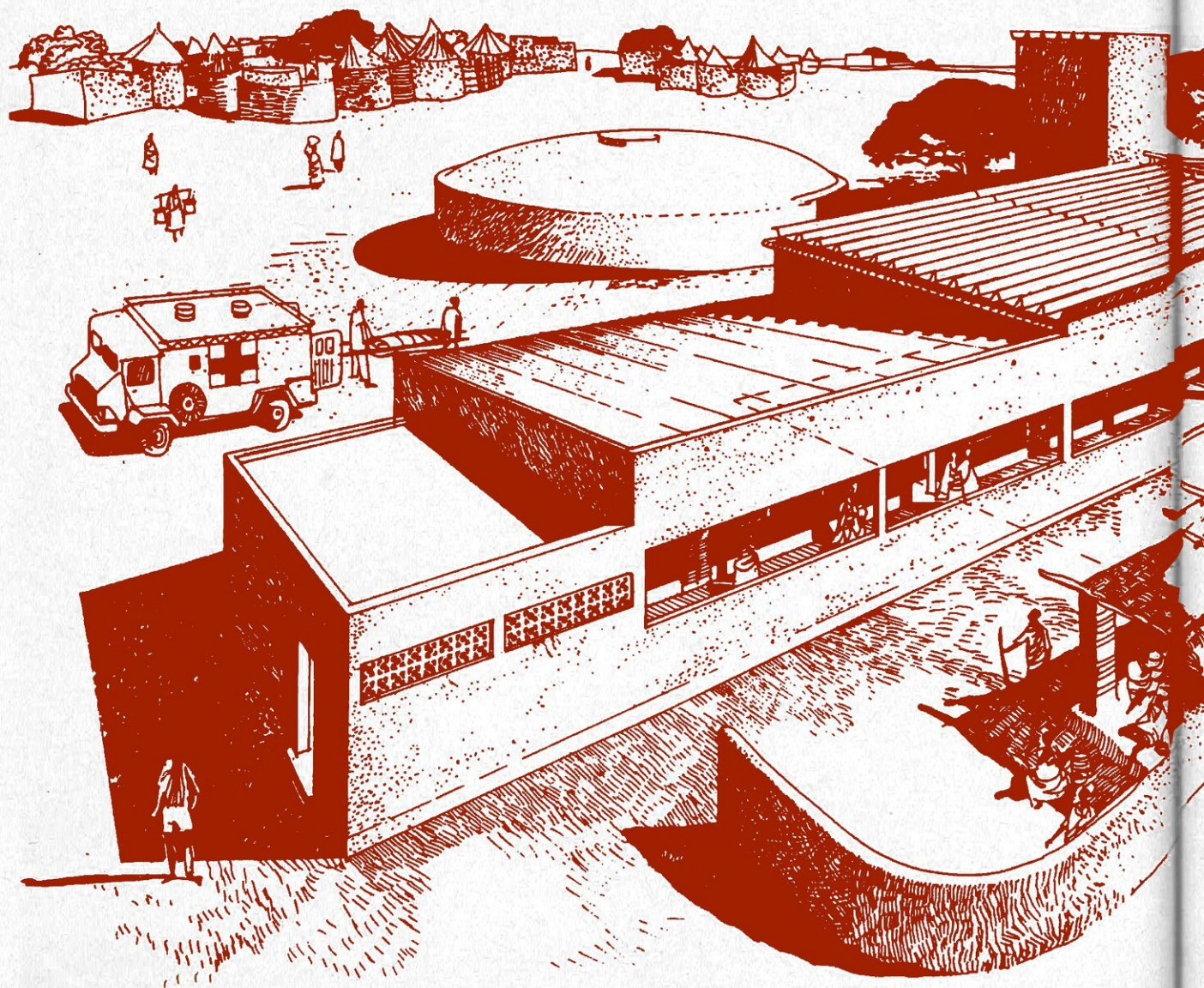
Suite page 114



Odeillo : de cette cabine, est commandée l'orientation d



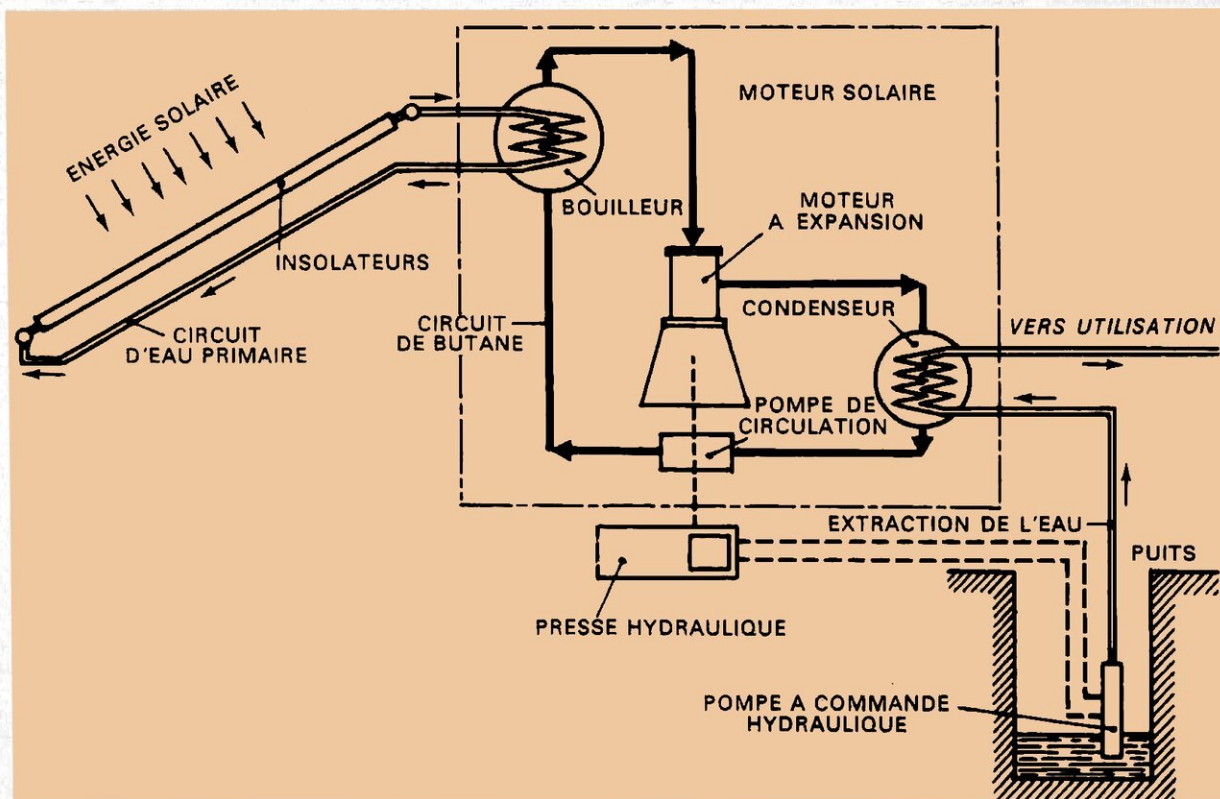
des miroirs dits concentrateurs qui renvoient le rayonnement solaire sur le miroir principal.





G. J. M. ALIZANDROFF ARCH. D.R.L.G

Plusieurs installations de pompage « solaire » conçues par la Société SO-FRETES existent déjà, en Afrique, au Mexique ou au Brésil. La pompe de l'Institut de physique météorologique de Dakar (page de gauche) a une surface de collecteur de 12 m^2 et un débit de 1 200 litres à l'heure. On songe aussi, à des projets de grande envergure. C'est le cas d'un prototype d'hôpital (ci-contre) où à partir d'un collecteur solaire de toiture de 60 m^2 , on parviendrait à fournir non seulement l'eau mais encore l'électricité et la réfrigération d'une réserve de médicaments.



tique est équipé de piles solaires de 300 watts. En France, des balises radio fonctionnent aussi à l'aide de photopiles. Dans l'ensemble, elles sont peu nombreuses.

En fait, tous les travaux de recherches sur les photopiles ont été jadis orientés dans le sens de la haute performance et de la légèreté, sans se soucier des coûts de production. Mais les choses ont changé. A côté des piles silicium sont apparues ces dernières années les cellules en couches minces dont les matériaux sont le sulfure ou le tellure de cadmium.

Ces cellules s'adaptent mieux que celles au silicium à la fabrication en continu. Leur rendement, de l'ordre de 8 à 10 %, peut encore être considérablement amélioré. Des recherches sont activement menées en France par le CNES (1).

Si de telles cellules étaient un jour fabriquées en grande série à des prix de revient beaucoup plus bas, il en résulterait certainement une révolution dans la manière d'utiliser l'énergie solaire. C'est pourquoi les spécialistes fondent les plus sérieux espoirs sur cette filière de conversion, dont ils pensent que la compétitivité sera atteinte avant 1990.

La filière thermo-électrique

La filière thermodynamique transforme, quant à elle, le rayonnement en chaleur, puis utilise cette chaleur dans une centrale classique pour faire tourner un turbo-alternateur. La conversion est d'autant plus efficace que la température de la source chaude est plus élevée. Le rendement actuel de la transformation est de l'ordre de 10 %.

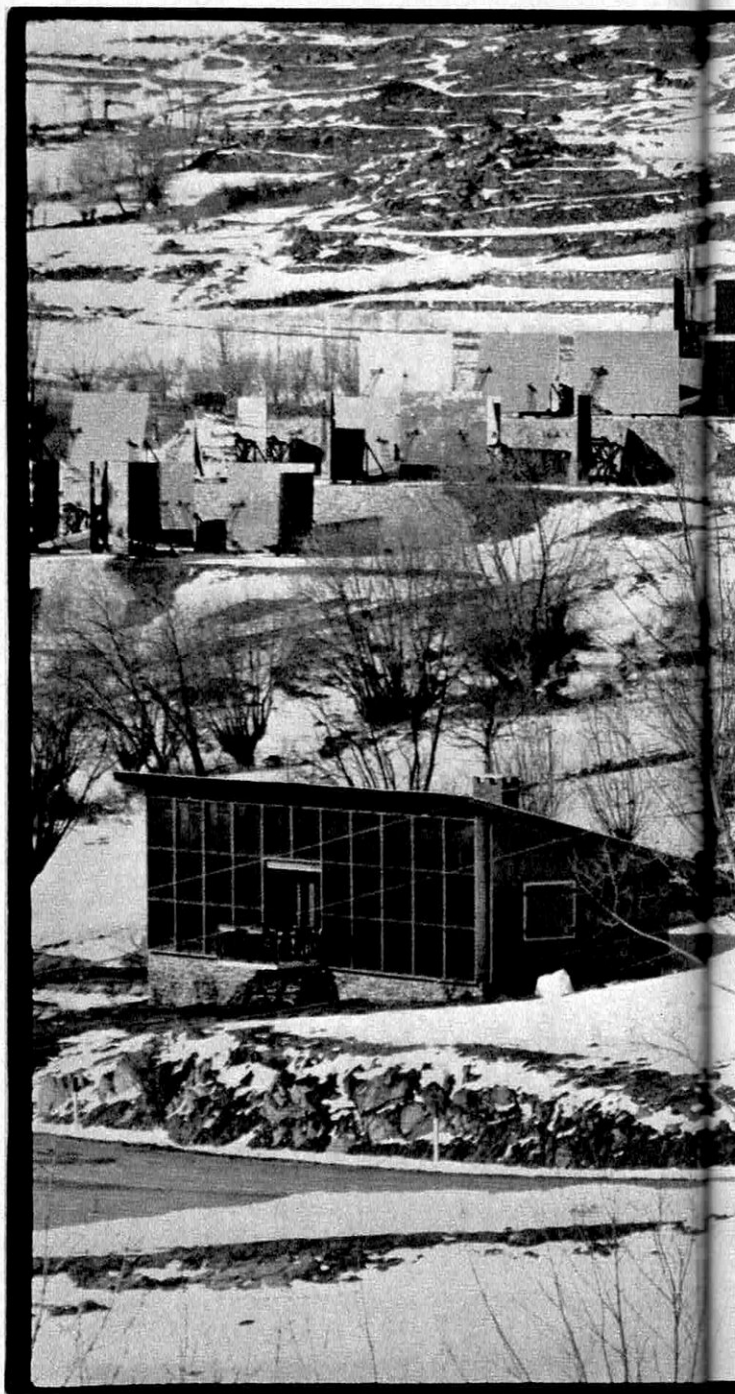
La production d'énergie solaire en grande quantité repose d'abord sur la focalisation des radiations sur des surfaces capables de les absorber et de produire des températures suffisantes. C'est ce que font les collecteurs thermiques.

On distingue parmi eux les collecteurs avec concentration et les collecteurs sans concentration. Les collecteurs avec concentration, du type « four solaire », reposent sur des systèmes optiques (miroirs, lentilles...) orientés vers le Soleil. On y obtient de très hautes températures, donc un bon rendement de conversion.

La France dispose du plus grand four solaire du monde à Odeillo. Le miroir parabolique d'Odeillo reçoit les réflexions de 63 orientateurs de 45 m² étagés en gradins et attaquant des régions différentes du « concentrateur ». Avec une puissance de 1 000 kW, il permet d'atteindre des températures de 4 000°.

Les applications de ce four étaient jusqu'ici limitées au domaine de la physico-chimie des hautes températures. Mais actuellement, le laboratoire oriente ses recherches vers la conversion d'énergie solaire en électricité.

En URSS, une « centrale solaire » utilise des miroirs montés sur wagonnets se déplaçant sur



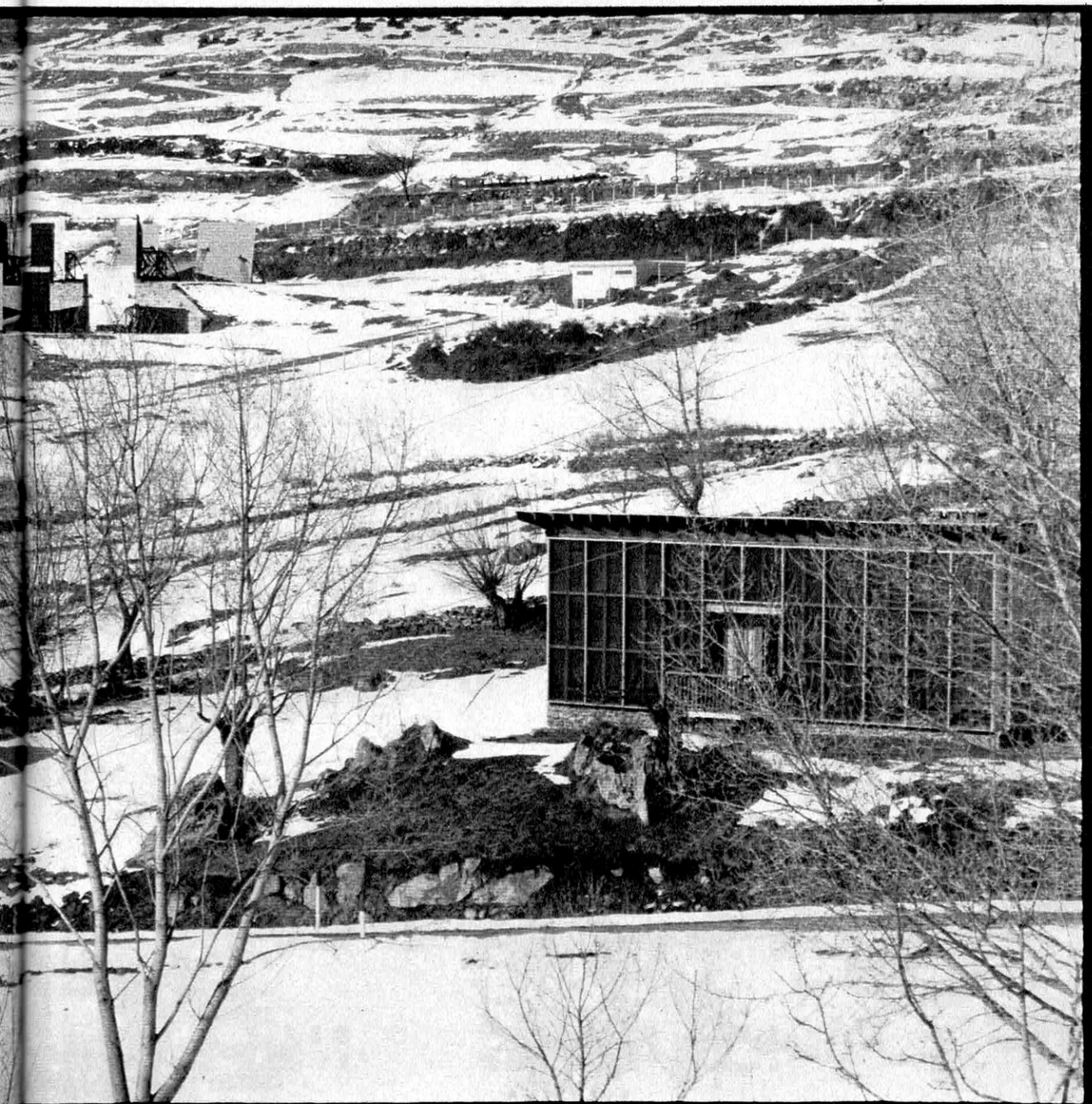
Deux maisons « solaires » construites à proximité du fo

un épi circulaire en fonction de la course du Soleil au cours d'une journée, pour produire 1 500 kW.

Aux Etats-Unis, les recherches s'orientent surtout vers les systèmes sans concentration, aux structures plus simples. Ces capteurs, du type « serre », peuvent être placés au ras du sol, mais les pertes par rayonnement sont plus fortes, donc les températures plus basses. Les chercheurs de l'Université de l'Arizona espèrent atteindre des températures supérieures à 500 °C pour avoir malgré tout de bons rendements.

Qu'ils soient avec ou sans concentration, les capteurs sont encore très onéreux. Aussi est-ce

(1) Centre National d'Etudes Spatiales.



Jean Marquis.

four d'Odeillo. Elles utilisent le principe des serres, piégeant la chaleur derrière leur façade vitrée.

dans les pays mal équipés que l'électricité solaire pourra trouver ses premiers débouchés. Il n'y a là nul paradoxe. Il sera plus avantageux d'alimenter ainsi une ferme isolée, dans les pays chauds ou dans les régions de montagne, que de relier de gigantesques « serres » au réseau, par l'intermédiaire de turbo-alternateurs classiques.

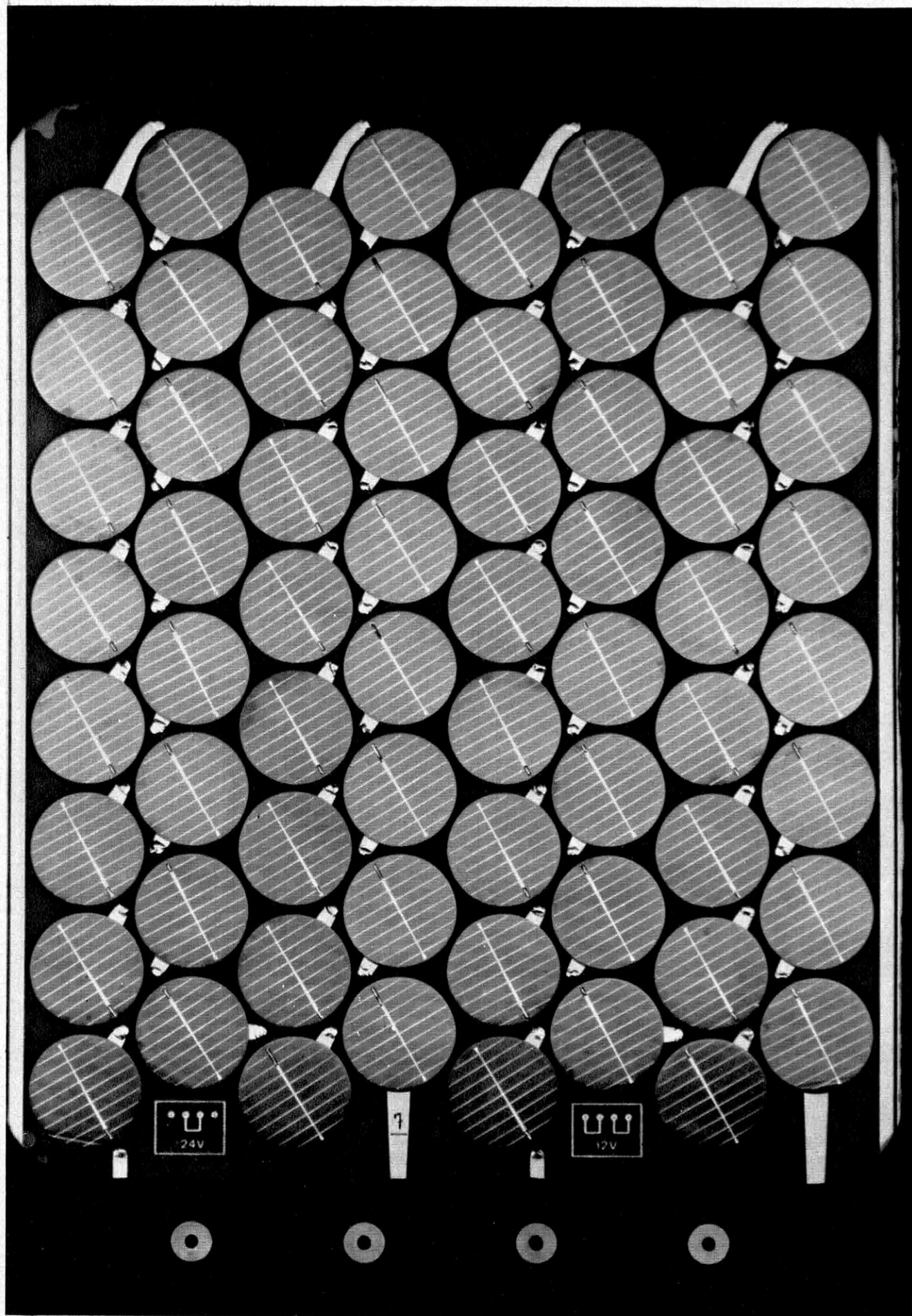
L'énergie solaire est, en tout cas, soumise à l'influence des conditions atmosphériques et à l'alternance du jour et de la nuit. C'est un gros inconvénient, qui implique la mise au point de systèmes de stockage de l'énergie pour les périodes sans soleil.

Le stockage sur accumulateur semble peu

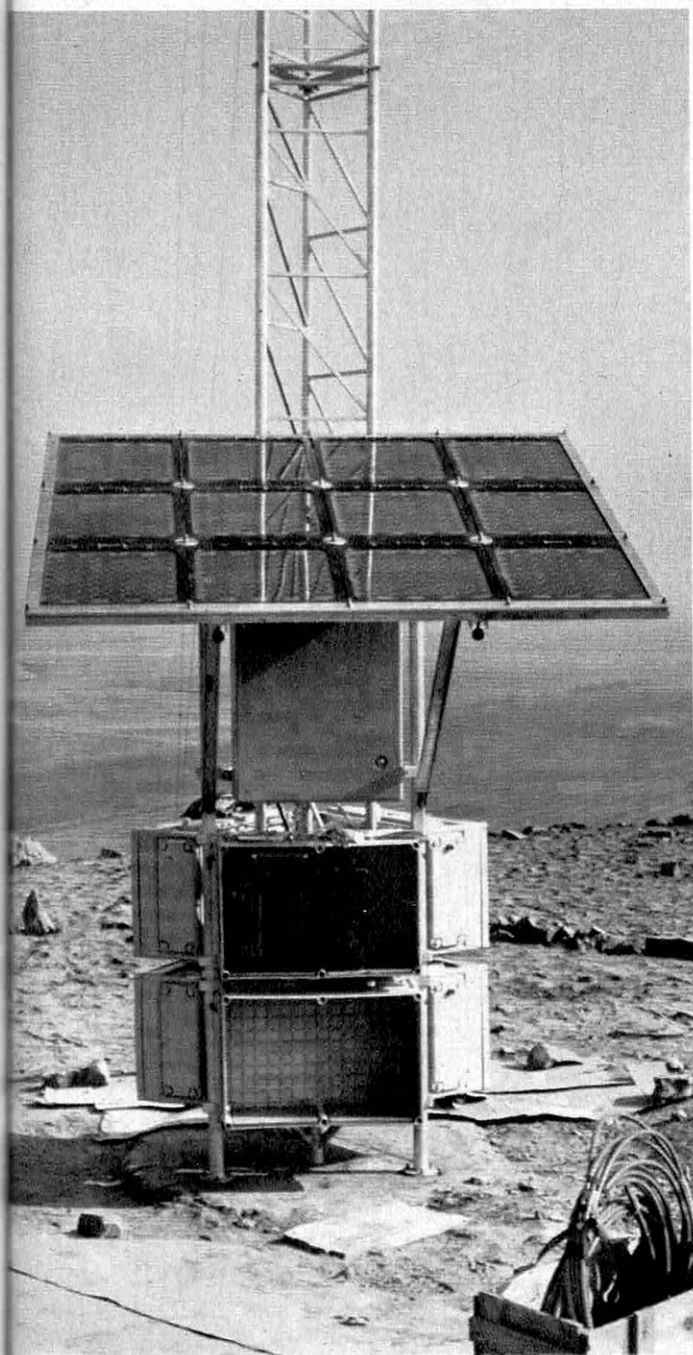
adapté en raison de son mauvais rendement et de son coût. Le stockage thermique est plus intéressant. La chaleur véhiculée par un fluide est accumulée dans des empilages de matériaux réfractaires qui restituent la chaleur emmagasinée au moment opportun. Le Laboratoire du CNRS étudie une méthode qui consiste à enterrer des tubes dans lesquels circulent le fluide.

Des solutions « exotiques »

Le stockage par changement d'état est à l'étude. Il met à profit les propriétés des sels eutectiques d'absorber et de restituer la chaleur



Il existe déjà des applications terrestres importantes de la technologie des cellules solaires. La Société RTC commercialise, par exemple, des modules de 8 W de 64 cellules au silicium interconnectées sur un stratifié en fibres de verre par l'intermédiaire d'un câblage imprimé (page de gauche). De tels modules peuvent alimenter les relais de télévision dans des régions de montagne isolées (ci-dessous). Ils alimentent aussi le balisage lumineux de certains aéroports.



selon qu'ils passent de la phase liquide à la phase solide et inversement.

Une possibilité serait d'utiliser des métaux comme le sodium. Un projet de centrale de 1 000 mégawatts est à l'étude aux Etats-Unis. Des capteurs du type « serre » recueilleraient l'énergie sur une surface de 16 km². Dans ces serres se trouveraient des canalisations où circule du

sodium fondu à une température de plus de 500 °C. Il servirait à alimenter un échangeur de chaleur pour produire de la vapeur, ou un système de stockage basé sur les propriétés des sels eutectiques.

Dans les laboratoires, les biochimistes commencent aussi à se débroussailler les mécanismes très complexes de la synthèse chlorophyllienne. Les plantes sont en effet les meilleurs accumulateurs et transformateurs connus de l'énergie solaire. Les Américains proposent de cultiver des plantes à croissance rapide, comme les algues, qui seraient ensuite prélevées, entassées et ensimencées de bactéries. La décomposition des algues sous l'action des bactéries fournirait un combustible de choix : le méthane.

Une centrale en orbite

Le projet de centrale solaire le plus spectaculaire est incontestablement celui proposé par la firme américaine Arthur D. Little et son directeur P. Glaser. Il ne concerne rien moins qu'un satellite géant producteur d'énergie en orbite autour de la Terre. De la science fiction ? Peut-être, mais l'idée est prise très au sérieux par la NASA qui lui consacra quelque 6 millions de dollars. Dans l'Espace sont en effet réunies les conditions les plus favorables pour la conversion de l'énergie solaire.

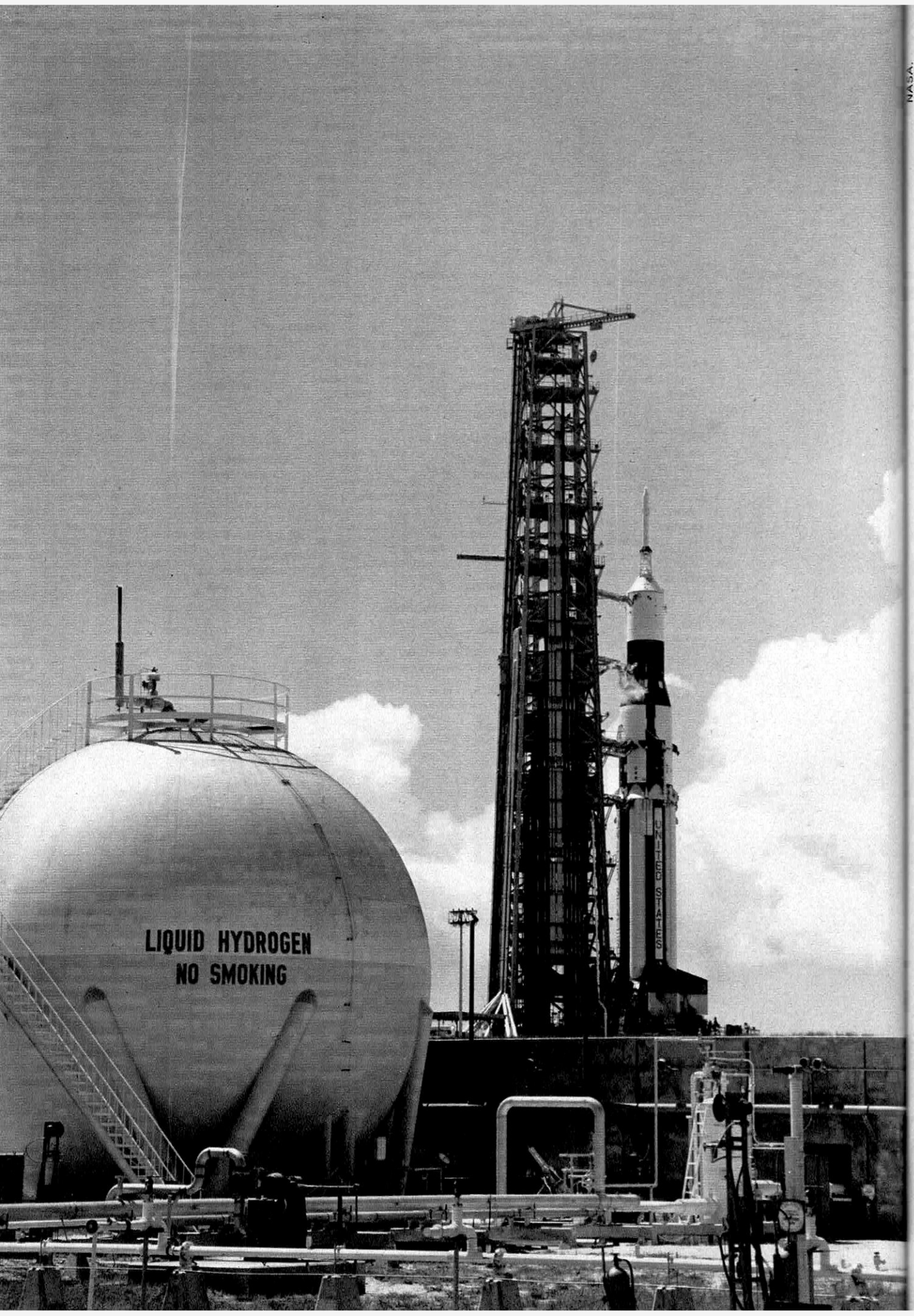
L'engin, qui mesurerait plus de 10 km de long et 5 km de large et pèserait de 10 000 à 13 000 tonnes, serait maintenu en orbite géostationnaire à 35 000 km de la Terre. Deux panneaux solaires formés de cellules au silicium analogues à ceux utilisés dans les expériences spatiales, mais de 25 km² chacun, seraient implantés de part et d'autre d'une antenne centrale de 1 km de diamètre assurant, après conversion en micro-ondes hertziennes, la transmission à la Terre. Recueillie par une antenne de 7 km de diamètre, l'énergie hertzienne serait à nouveau transformée en courant continu industriel.

P. Glaser estime que ce système est six fois plus « performant » qu'une centrale hypothétique implantée dans une région désertique du Sud-Ouest des Etats-Unis. La perte par production de chaleur serait minime. L'antenne réceptrice pourrait être installée soit sur Terre, soit sur des plates-formes marines près des grands centres de consommation.

La mise en pratique de ce projet se heurte certes à des difficultés considérables, ne serait-ce que pour installer dans l'espace un engin de cette taille. Il faudrait s'assurer en outre que les micro-ondes en question ne sont pas nuisibles à la vie animale ou humaine ni aux télécommunications.

Quel sera l'avenir de l'énergie solaire ? Il est peut-être trop tôt pour le dire, mais encore faudrait-il favoriser et inciter les recherches et les applications en leur consacrant des moyens financiers suffisants. Cette attitude relève des gouvernements.

Marie-Jeanne HUSSET



Les techniciens de l'Espace
ont acquis au fil des ans
une grande maîtrise
dans la manipulation
des carburants cryogéniques,
et en particulier de
l'hydrogène liquéfié à -253°

L'ÉCONOMIE A L'HYDROGÈNE

*Alors que la crise
de l'énergie n'était encore
qu'une hypothèse lointaine,
divers groupes
de chercheurs avaient
déjà proposé l'hydrogène
comme combustible
universel de l'an 2000.
Le plus léger
des corps simples
offre en effet bien des
séductions. Mais
sa production pour
les besoins de
l'industrie mondiale,
à partir de l'eau des océans,
suppose le recours
à des techniques
tout à fait originales.*

● Les spécialistes l'annonçaient pour la fin du siècle. La « crise de l'énergie » a en fait éclaté en 1973, déjouant tous les pronostics. Ainsi, le défi que pose à l'économie des pays industrialisés l'accroissement de la demande d'énergie se trouve aggravé par l'augmentation générale des prix des produits énergétiques. Pour satisfaire à la demande, l'énergie nucléaire doit prendre dans ces pays une place de plus en plus importante, et ce plus rapidement qu'il n'avait été prévu, par exemple en France.

Une économie fondée principalement sur le nucléaire comme énergie primaire et sur l'électricité pose en fait de nombreux problèmes. Les centrales nucléaires géantes n'ont qu'un rendement de 30 %. Cela veut dire que d'énormes productrices de chaleur seront installées au bord des rivières, de la mer ou sur l'océan lui-même grâce à de véritables îles flottantes.

De plus en plus massives, ces centrales seront alors de plus en plus éloignées des zones d'utilisation. Et le transport de l'électricité par câbles sur de longues distances est coûteux et grevé de pertes importantes. Les recherches sur les câbles supraconducteurs, qui réduiraient presque totalement les pertes, se poursuivent, mais il est peu probable que ces techniques, elles-mêmes très onéreuses, « débouchent » dans un proche avenir.

D'autre part, la production d'énergie ne peut suivre les fluctuations du marché car l'électricité ne peut se stocker. Elle ne s'adapte d'ailleurs pas à tous les besoins.

Utiliser l'énergie nucléaire pour fabriquer un

combustible que l'on pourrait stocker et transporter comme on stocke et transporte le gaz naturel, un combustible qui, aussi, répondrait aux exigences de la protection de l'environnement, telle est la solution proposée par de nombreux spécialistes.

Le combustible qui présente le plus d'avantages est l'hydrogène. Produit en grande quantité à partir de l'eau en utilisant, directement ou non, l'énergie thermique engendrée dans les réacteurs nucléaires, l'hydrogène jouerait le rôle de « vecteur d'énergie ».

Les avantages de l'hydrogène

Si les spécialistes pensent que l'hydrogène peut devenir « le » combustible de l'avenir, c'est que ses propriétés sont particulièrement intéressantes.

Il est l'élément le plus abondant dans la nature. Il peut être produit à partir de l'eau, et son utilisation finale comme combustible redonne de... l'eau. C'est la solution idéale pour l'environnement. Par ailleurs, le cycle écologique au cours duquel l'hydrogène est ramené à l'état d'eau ne serait que quelques semaines, alors que le cycle de régénération des combustibles fossiles est de plusieurs millions d'années.

L'hydrogène pourrait couvrir tous les besoins du marché. Il remplacerait l'essence des voitures et le combustible des avions, le coke pour la réduction des minerais, et il alimenterait même des centrales électriques de moyenne puissance, implantées sur les lieux de consommation.

Certes, c'est un gaz dangereux et le transport comme le stockage en grandes quantités exige-

raient des précautions particulières. Mais le problème auquel se heurtent les chercheurs est en fait celui de sa production.

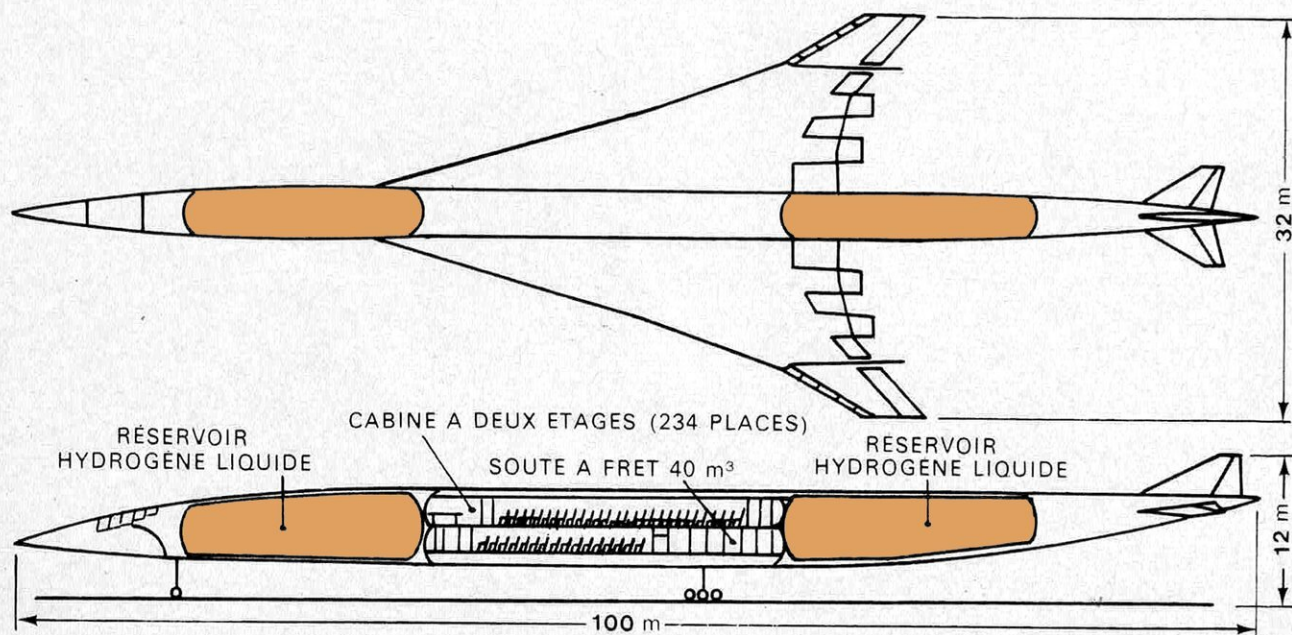
Une demande croissante

A l'heure actuelle, l'hydrogène consommé dans le monde est produit par distillation de la houille ou par électrolyse de l'eau. La production annuelle est estimée à 20 millions de tonnes. La moitié est utilisée dans la synthèse de l'ammoniac, le quart dans les procédés d'hydrogénation, de cracking et d'hydrodésulfuration des hydrocarbures. Le reste est employé dans la synthèse du méthane et de divers autres produits chimiques.

La demande ne cesse de croître (ainsi, l'Europe des Neuf consommera à elle seule, en 1980, plus de 10 millions de tonnes d'hydrogène par an). Les traitements par hydrogénation sont de plus en plus importants dans l'industrie. La désulfuration des combustibles tend à se généraliser pour lutter contre la pollution. Et, surtout, on aura de plus en plus besoin de remplacer le gaz naturel en fabriquant, à partir du charbon, par exemple, du gaz artificiel à haut pourcentage de méthane.

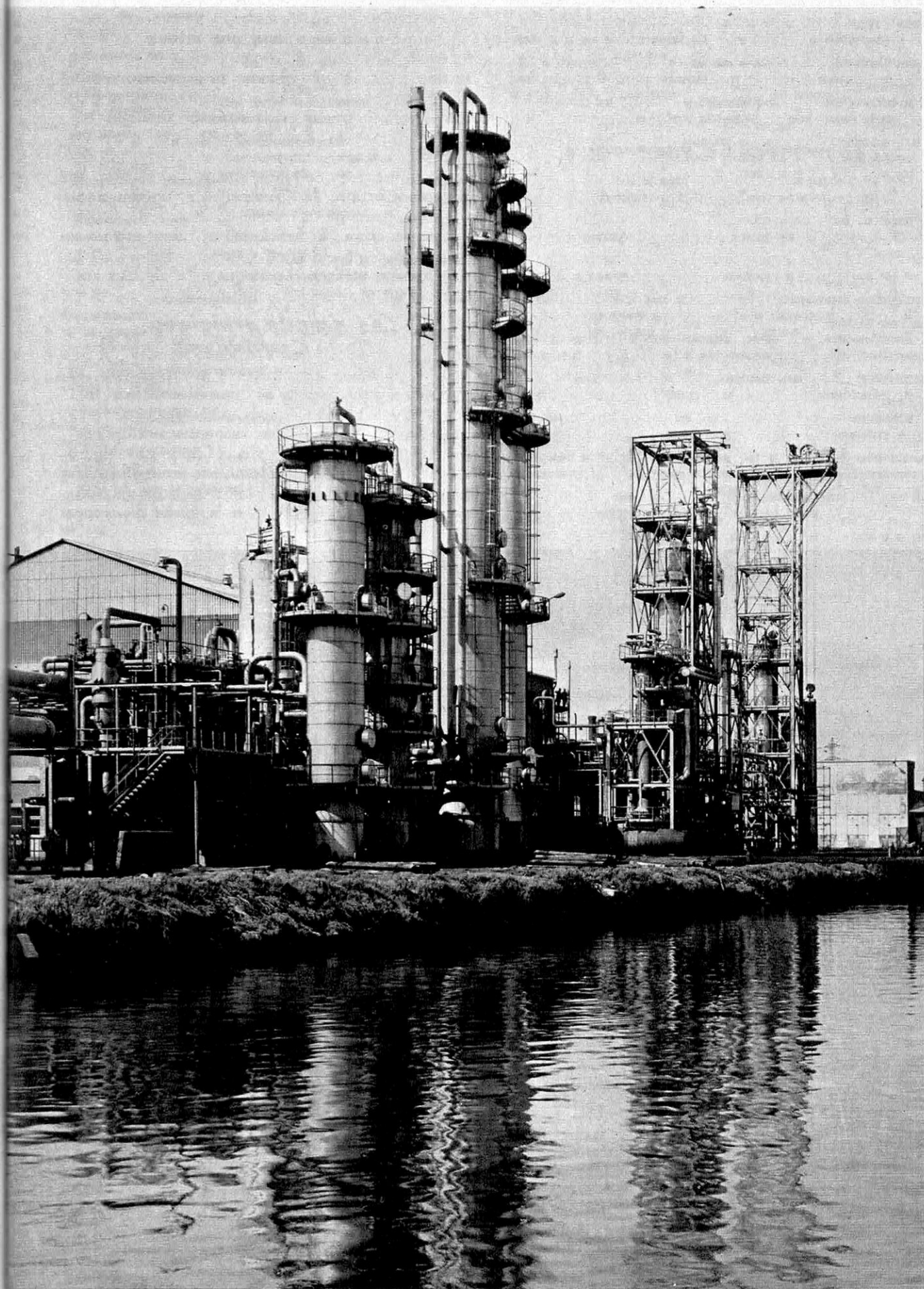
Dans une « économie à l'hydrogène », les quantités requises seront très importantes. C'est pourquoi les recherches sur les procédés d'extraction s'accroissent depuis quelques années, tant aux Etats-Unis qu'en Europe.

Deux grands axes s'offrent pour produire le gaz par dissociation de l'eau avec, comme énergie primaire, l'énergie nucléaire : l'électrolyse et



Utiliser l'hydrogène comme carburant d'aviation offrirait un certain nombre d'avantages, mais aussi des inconvénients liés à la trop faible énergie par unité de volume de l'hydrogène liquide. D'où un grave problème d'encombrement à bord.

L'hydrogène est déjà un produit industriel de première importance. Il sert en particulier à la production d'ammoniac par synthèse totale (photo ci-contre). Mais l'économie à l'hydrogène mettrait surtout à profit son pouvoir calorifique élevé.



Bazin - UGINE Kuhlmann.

les cycles chimiques d'oxydo-réduction.

L'électrolyse de l'eau (additionnée d'un sel pour accroître sa conductivité) consiste en une décomposition de la molécule par passage de courant continu. L'énergie primaire devra donc d'abord être transformée en courant continu.

Les procédés d'électrolyse

Trois procédés d'électrolyse sont à l'étude :
— l'électrolyse en milieu alcalin liquide, à basse température ;

— l'électrolyse en phase vapeur, à haute température ;

— l'électrolyse à travers des membranes par lesquelles s'échangent des ions, en milieu acide ; elle utilise comme catalyseurs des métaux nobles.

Le premier procédé est déjà employé dans les installations produisant de l'hydrogène pour la synthèse de l'ammoniac, dans les régions où l'électricité n'est pas très chère. Les cuves à électrolyse comportent des électrodes de nickel dans une solution aqueuse de potasse, à des températures de 70° à 80 °C, avec circulation d'eau de refroidissement. Le rendement de l'électrolyse seule tourne autour de 60 %.

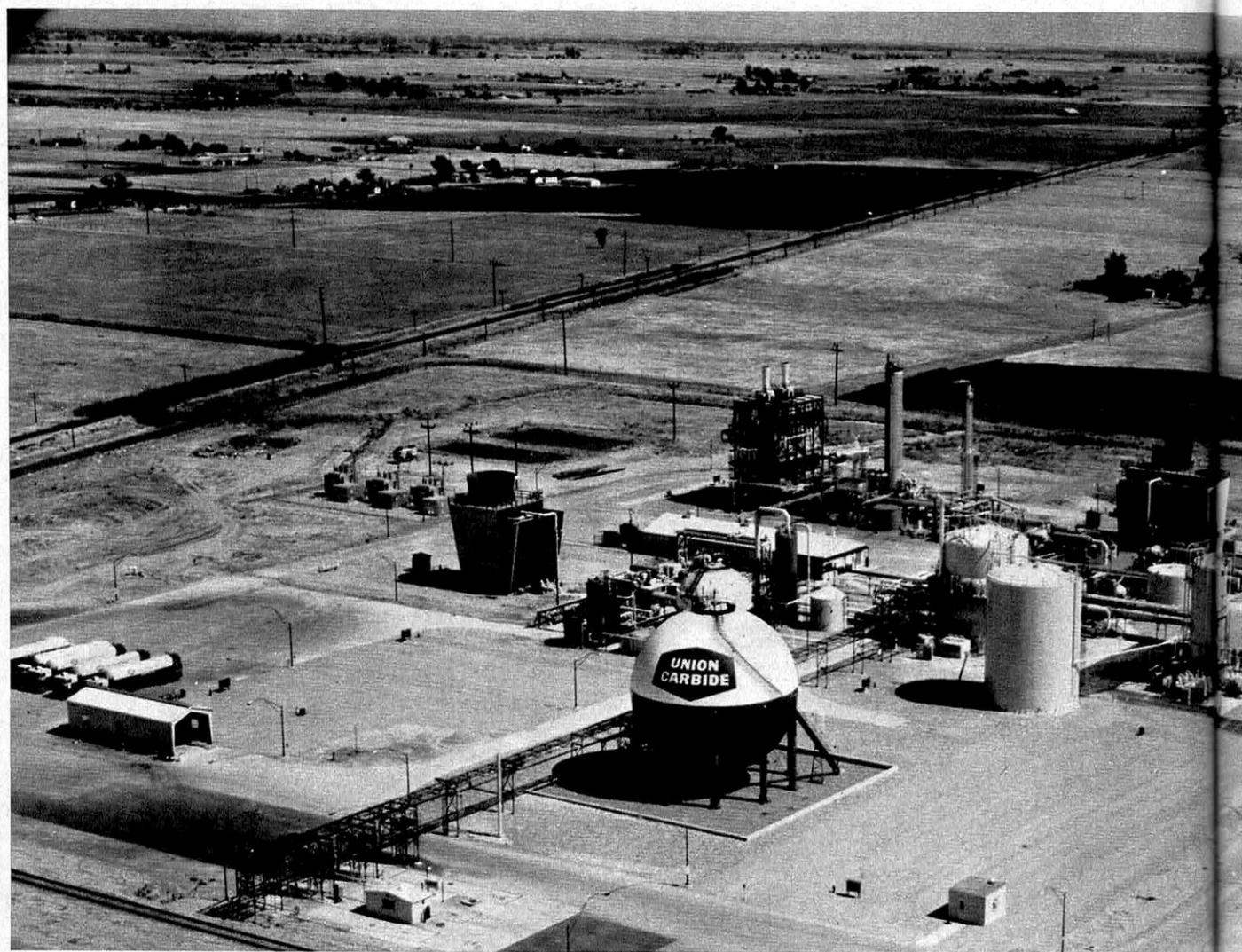
Quel que soit le procédé d'électrolyse choisi,

il faut d'abord transformer la chaleur nucléaire en énergie mécanique dans une turbine, puis en électricité dans un alternateur, puis en courant continu grâce à un système redresseur. Autant d'opérations qui font chuter le rendement global, sans compter que l'électrolyse réclame de grandes quantités d'électricité et que c'est un procédé coûteux.

Les chercheurs essaient bien d'améliorer le rendement propre de l'électrolyse en augmentant la température ou la pression. Il semble toutefois peu logique de fabriquer un combustible à partir d'une énergie aussi « noble » que l'électricité. Autant utiliser directement la chaleur nucléaire pour produire ce combustible.

Les grands principes de la thermolyse

La dissociation directe de l'eau en oxygène et hydrogène par cassure de la molécule n'a lieu qu'à 2 500 °C. Cette température est encore très au-dessus de celles que les réacteurs actuels permettent d'atteindre. Les réacteurs à eau légère offrent à peine 320 °C. Même les premiers réacteurs à haute température n'atteindront pas encore (ou à peine) 1 000 °C à la sortie du cœur.



Une usine d'hydrogène liquide à Sacramento (Californie). Sa production atteignait 60 tonnes par jour en 1964.

Les chercheurs du centre de l'Euratom à Ispra (Italie) ont eu l'idée d'étudier des procédés thermochimiques permettant de décomposer l'eau en plusieurs étapes par des réactions d'oxydo-réduction ayant lieu à des températures inférieures ou voisines de 1 000°. Au cours de ces réactions, tous les produits chimiques doivent être régénérés, de sorte que, globalement, cela revient à la production d'hydrogène et d'oxygène à partir d'eau et de chaleur.

A l'heure actuelle, de nombreux cycles chimiques sont proposés et étudiés dans des laboratoires d'Europe, des Etats-Unis et du Japon.

La première filière, dénommée Mark 1 et mise au point par de Beni (l'un des directeurs du Centre d'Ispra) en 1969, consiste à faire agir de la vapeur d'eau sur du bromure de calcium, à 730 °C, puis du mercure sur l'acide bromhydrique formé dans la première réaction.

Le rendement du procédé, qui se définit comme le rapport entre la chaleur de combustion de l'hydrogène et la chaleur nécessaire pour le former, n'est encore que de 55 %, mais il pourra être amélioré.

L'énorme avantage de cette filière est de ne nécessiter qu'une température maximum de

730°. Elle présente cependant quelques inconvénients : le mercure est un produit coûteux et dangereux qui, en cas d'accident, poserait de gros problèmes de pollution ; quant à l'acide bromhydrique, c'est un produit corrosif dont les effets sur les matériaux sont encore mal connus.

Les chercheurs d'Ispra étudient, pour cette raison, des matériaux résistants : molybdène, alliages de zirconium et de niobium, aciers spéciaux. Ils tentent également de remplacer le mercure par du cuivre, ce qui exigerait une température plus élevée, 900 °C, pour la décomposition de l'oxyde de cuivre formé. Remplacer le calcium par du strontium simplifie le cycle, mais présente une difficulté : le bromure de strontium est plus difficile à hydrolyser que le bromure de calcium.

Une autre filière, Mark 2, à base de manganèse, est à l'étude : des hydroxydes alcalins réagissent avec un métal pour donner un oxyde et de l'hydrogène. Ainsi la soude réagit avec le manganèse (ou un de ses oxydes) à une température de 700 °C environ.

Une troisième filière (Mark 3), repose sur l'action du chlore sur un métal de transition. Les chercheurs de la division Allison de General Motors ont ainsi décrit un cycle où l'acide chlorhydrique réagit sur le chlorure de vanadium à 700° ou 800 °C.

D'autres cycles faisant intervenir le fer, le tantale, le bismuth ou leurs chlorures, ont été envisagés à Ispra.

Des cycles à cinq réactions ont été étudiés par le professeur Knoch à Aix-la-Chapelle, reposant sur l'action de l'eau sur le fer à 1 000 °C. D'autres cycles ont l'intérêt de ne nécessiter que trois réactions, dans lesquelles réagissent le chlore, l'eau et le chlorure de sodium.

En France, le Gaz de France et le CEA collaborent, dans le cadre du programme « Hydre », à l'étude de cycles à trois réactions faisant intervenir le potassium et ses oxydes. Le CEA doit mettre au point le réacteur nucléaire.

Les réacteurs à haute température

Le problème essentiel est celui de l'obtention des hautes températures. Plus la température croît, plus le nombre de cycles possibles augmente, plus ces cycles se simplifient et plus le rendement s'améliore. C'est, pensent les experts, dans une gamme de températures comprises entre 800° et 1 200 °C que se situent les procédés pouvant conduire à la production massive d'hydrogène.

La mise au point d'un mode de fabrication de l'hydrogène exige un véritable bond technologique. Il faut d'abord construire le réacteur adéquat, puis étudier le génie chimique du cycle en fonction de la fiabilité, de la sécurité, du rendement, du coût d'investissement. Car c'est une chose de mettre au point une filière au laboratoire et une autre de l'exploiter à l'échelon industriel.

Les réacteurs à haute température sont en-



plein « boom » spatial.

core au tout début de leur histoire. La première centrale électrique du monde qui utilise un réacteur de cette catégorie entre à peine en fonctions à Fort Saint-Vrain aux USA. En 1972, le CEA, associé à un groupement industriel, a signé une série d'accords avec la compagnie américaine Gulf General Atomic. Ces accords prévoient, pour les quinze ans à partir de cette date, une collaboration industrielle et commerciale entre les trois partenaires pour le développement, la construction et la vente de chaudières nucléaires à cycle vapeur issues du modèle Gulf General Atomic.

Dans ce type de réacteur, le combustible est constitué de pastilles d'oxyde d'uranium très enrichi et de thorium, ou encore d'oxyde d'uranium faiblement enrichi, pastilles de moins d'un millimètre de diamètre, enrobées de carbure de silicium dans une matrice de graphite. La température maximale du point le plus chaud est de 1 350 °C. Un circuit d'hélium primaire assure le refroidissement proprement dit du réacteur, tandis que le transfert de la chaleur s'opère vers un circuit d'hélium secondaire, pour des raisons de sécurité et de facilité d'exploitation.

CEA et GDF ont ainsi étudié un projet d'installation comprenant un réacteur nucléaire de 3 000 MW et un cycle chimique de production d'hydrogène par oxydo-réduction du potassium.

Le choix entre les procédés basés sur l'électrolyse et ceux utilisant des cycles chimiques dépendra des rendements que l'on pourra obtenir. Toutes les études montrent que les cycles chimiques offrent des rendements très supérieurs à ceux de l'électrolyse. Ainsi, entre 500 °C et 800 °C, le rendement théorique tourne autour de 75 % (si l'on considère le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène). Entre 800 et 1 200 °C, températures permises dans quelques années, le rendement est de 85 %. Dans le cas de l'électrolyse, et dans une perspective lointaine, un rendement de 45 % seulement est espéré (pour l'ensemble réacteur nucléaire, turbine, alternateur, redresseur, cuve à électrolyse).

D'autres voies sont explorées pour le choix d'une source d'énergie primaire. On pourrait utiliser l'énergie libérée par un plasma en fusion

pour exciter des atomes d'aluminium. Ces atomes excités émettent des radiations ultraviolettes qui seraient envoyées sur de la vapeur d'eau qu'elles décomposent par effet photochimique. Le rendement d'un tel procédé serait très élevé.

Malheureusement, le principal obstacle réside dans la nécessité de disposer de réacteurs nucléaires de la seconde génération qui ne seront pas disponibles avant le début de l'an 2000.

L'énergie solaire pourrait également servir de source primaire, l'énergie géothermique offrant, quant à elle, des températures trop faibles.

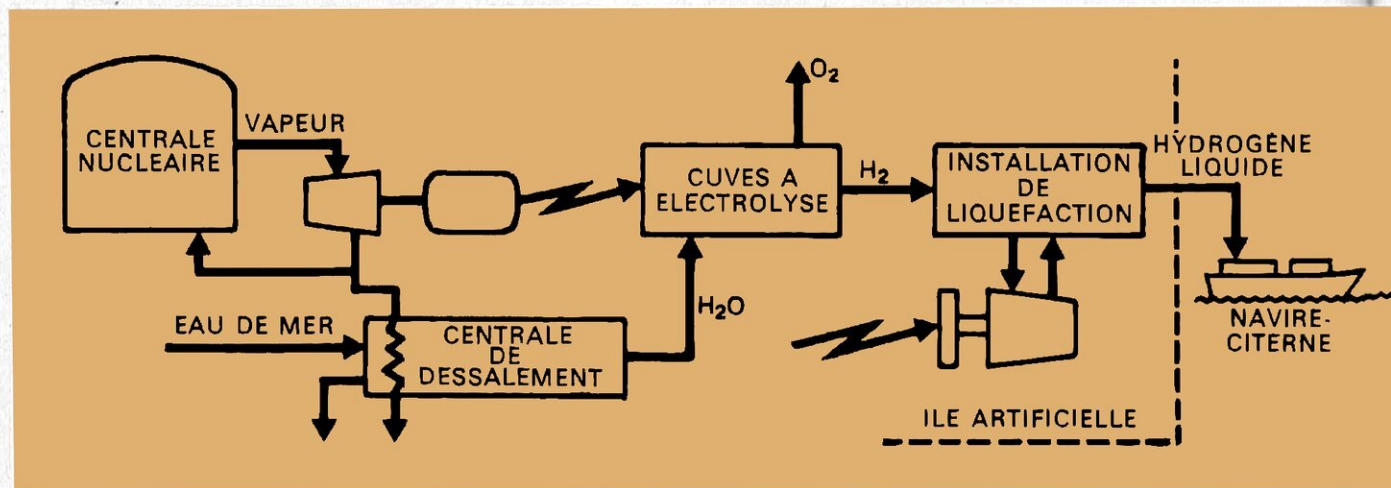
Transport et stockage

Le transport et le stockage de grandes quantités d'hydrogène ne posent pas vraiment de problème technique. Bien sûr, il faudra prendre des précautions. Si le gaz naturel est lui aussi un gaz explosif, pour enflammer un mélange air-hydrogène, il faut dix fois moins d'énergie que pour enflammer un mélange air-gaz naturel.

La sécurité nécessitera donc un contrôle strict de la construction des canalisations, une détection très fine des fuites (bien qu'en cas de fuite, l'hydrogène diffuse plus rapidement dans l'air que le gaz naturel). La ville de Bâle est déjà alimentée par un gaz contenant 80 % d'hydrogène, et cela ne semble pas poser de problèmes particuliers.

Des gazoducs souterrains peuvent transporter l'hydrogène. Des réseaux existent déjà en Allemagne fédérale sur plus de 20 km de longueur dans la région de Dusseldorf (où ils alimentent des usines chimiques). Des réseaux analogues parcourent le Texas.

Un gazoduc rempli d'hydrogène serait à peine plus large que s'il transportait du gaz naturel, et ce pour la même énergie. Même, si l'hydrogène est moins énergétique que le gaz naturel, puisque trois volumes d'hydrogène libèrent la même énergie qu'un volume de gaz naturel, ses faibles densité et viscosité permettent de tripler la capacité du gazoduc et d'espacer les stations de pompage. La puissance de compression serait toutefois supérieure, donc le coût du transport un peu plus élevé.



Pour le transport sur de longues distances par mer, il serait préférable de liquéfier l'hydrogène et de l'enfermer dans des citernes cryogéniques. Mais on dispose ici d'une expérience importante grâce aux méthaniers construits depuis quelque dix ans. La technologie de la liquéfaction a été particulièrement étudiée aux Etats-Unis dans le cadre des programmes spatiaux. L'hydrogène liquide a été le combustible des fusées des vols Apollo et Skylab. Il est stocké au centre spatial de Cap Kennedy dans des containers de 4 000 m³.

Le stockage généralisé sous forme liquide semble peu avantageux, car la température requise est extrêmement basse, — 253 °C. Et si l'hydrogène liquide est deux fois et demie plus léger que le combustible usuel pour le même contenu énergétique, il est malheureusement trois fois plus encombrant.

D'autres modes de stockage sont plus intéressants : plusieurs milliards de mètres cube de

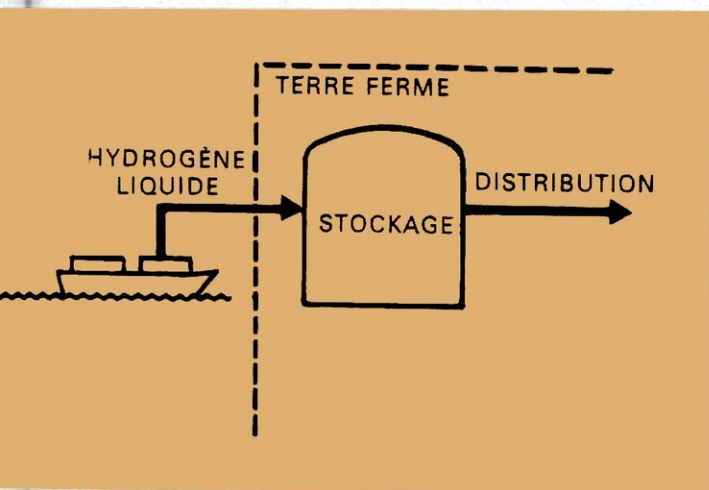
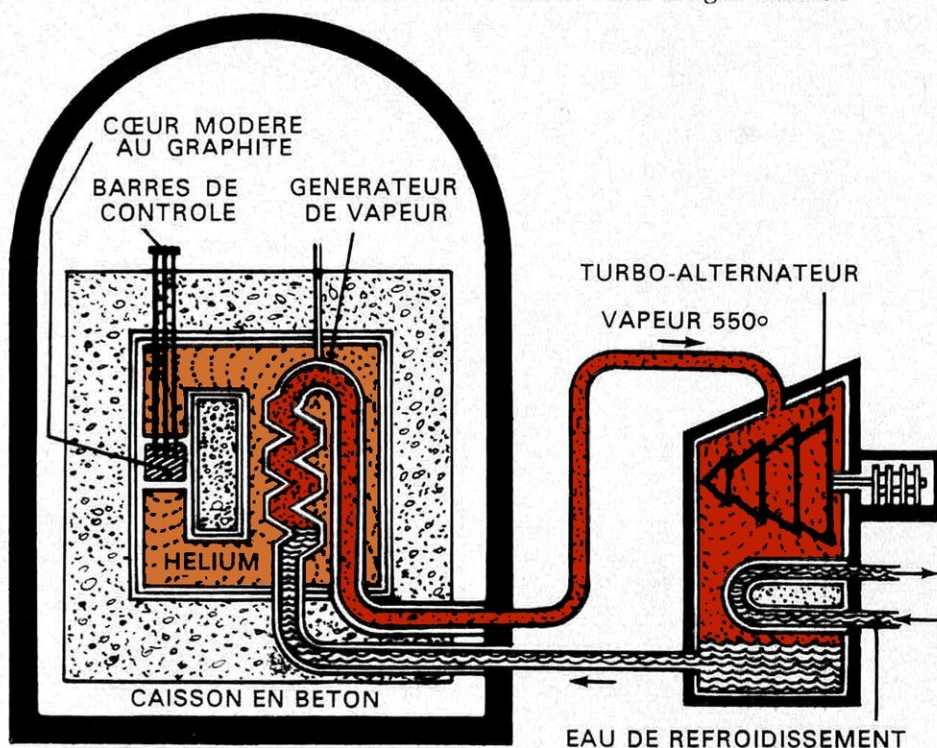
gaz pourraient être stockés, dans des conditions analogues au stockage souterrain du gaz naturel, dans des formations aquifères, dans des cavernes salines après lessivage, ou encore dans des anciens gisements de gaz ou de pétrole. Le Gaz de France stocke en structure aquifère du gaz contenant 60 % d'hydrogène, à Beynes près de Paris.

Le combustible à tout faire ?

L'hydrogène produit, stocké, transporté, comment pénétrera-t-il sur le marché ? Les spécialistes estiment que tous les secteurs pourraient l'utiliser. L'idée d'employer l'hydrogène n'est en fait pas nouvelle. Jadis le gaz de ville ou gaz manufacturé en contenait 50 % et plus et le premier moteur à hydrogène date de 1927.

L'introduction sur le marché pourrait être progressive.

Dans un premier temps, elle profitera des réseaux déjà existants de transport, stockage et distribution du gaz naturel.



L'économie à l'hydrogène n'en est encore qu'au stade des études préliminaires et le choix demeure entre plusieurs hypothèses. On pourrait utiliser directement la chaleur produite par un réacteur à très haute température (ci-dessus) pour décomposer l'eau de mer. Ou passer par son électrolyse (schéma ci-contre). Le transport de l'hydrogène pourrait s'effectuer par pipe-line ou par navires cryogéniques. Dans ce dernier cas, il faudrait évidemment disposer d'une usine de liquéfaction près du site de production.

Le secteur industriel qui, dès maintenant, l'utilise comme réducteur de certains minerais sera certainement un client de plus en plus gourmand, en raison de l'augmentation du prix du coke. Plusieurs procédés l'emploient pour la production de l'éponge de fer (H iron, Hyl, Pyrofer...). Dans les installations modernes, le minerai de fer en poudre est réduit, dans un réacteur à « lit fluidisé », à une température comprise entre 500 °C et 800 °C. Un réacteur nucléaire HTR de 2 500 MWth, alimentant une installation de production par voie chimique selon la première filière, pourrait servir à fabriquer 3,5 millions de tonnes par an d'éponge de fer.

La métallurgie fine pourrait tirer profit de la température élevée (2 086 °C) de la flamme dans l'air.

A l'horizon 2000

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant pour les véhicules automobiles est envisagée par de nombreux spécialistes. Le moteur à hydrogène présente l'énorme avantage d'être non polluant. La combustion n'entraîne que la formation d'eau et très peu d'oxydes d'azote.

Les chercheurs de l'Université de l'Oklahoma ont mis au point une technique dans laquelle l'hydrogène est simplement injecté dans le cylindre à la fin de la compression. Le moteur ne subit aucune modification ; il peut donc fonctionner aussi bien à l'hydrogène qu'à l'essence.

Le stockage dans le réservoir pose un problème important. Comme nous l'avons vu, l'hydrogène liquide est trois fois plus encombrant que le carburant usuel et doit être conservé à -253 °C. D'autres formes de stockage sont à l'étude. Ainsi les laboratoires Philips essaient de stocker l'hydrogène en le combinant dans des hydrures métalliques. La densité de stockage dans les hydrures des métaux de transition ou alcalino-terreux dépasse les taux massiques de 60 %. On récupère l'hydrogène soit par élévation de la température, soit par abaissement de la pression.

Les recherches sur les moteurs à hydrogène sont très avancées, notamment en France. L'enjeu est important pour plusieurs raisons : les voitures absorbent près de 20 % du budget énergie des pays industrialisés ; la pollution qu'elles occasionnent pose dans les villes de sérieux problèmes ; le prix des carburants ayant augmenté, l'hydrogène pourrait bientôt devenir économiquement accessible.

Pour le transport aérien, l'hydrogène liquide, qui est 2,5 fois plus léger que les « carburateurs » actuels, présente de gros avantages en particulier pour éviter ou diminuer la pollution à l'atterrissage et au décollage. Malheureusement il occupe un volume qui pose le problème des réservoirs. Mais il sera probablement le carburant des avions supersoniques commerciaux qui, dans le futur, voleront à des vitesses supérieures à Mach 3.

Pour les usages domestiques, l'utilisation de l'hydrogène, déjà ancienne, pourrait être progressive et partielle.

Habitera-t-on un jour une maison où tous les besoins en énergie sont assurés par l'hydrogène ? Cela semble encore peu probable. C'est pourtant un projet développé à l'Institute of Gas Technology de Chicago. L'éclairage, le chauffage, la cuisine, la réfrigération, la production d'électricité par des piles à combustibles seraient assurés par l'hydrogène.

La production d'électricité à partir d'hydrogène a beaucoup stimulé l'imagination des chercheurs. Des petites centrales implantées près des lieux de consommation pourraient être alimentées en hydrogène gazeux et fonctionneraient à l'aide de générateurs à turbine à gaz. Ou encore des batteries de piles à combustibles de plusieurs dizaines de mégawatts seraient réparties sur tout le territoire et même dans les agglomérations car elles ne provoqueraient aucune nuisance.

De petites piles de 10 à 100 kW seraient utilisées dans les secteurs domestiques. Dans ce domaine encore, les recherches doivent être poursuivies avant de pouvoir déboucher sur l'utilisation car il reste encore un facteur 2 à gagner tant sur le poids que sur le prix des piles. Leur réalisation est cependant bien avancée aux Etats-Unis où un groupe de sociétés productrices d'électricité finance la construction d'unités de 10 à 30 MW. Ces piles sont alimentées en gaz naturel et un dispositif de reformage effectue la conversion du gaz naturel en hydrogène. Le prix serait moins élevé si les piles étaient directement alimentées en hydrogène. Il faudra attendre encore quelques années pour cela.

L'hydrogène ne se substituera aux autres sources d'énergie et aux combustibles usuels que si son prix pour l'utilisateur est compétitif par rapport à celui de ses concurrents. Ce qui est probable dans le futur, en raison de l'augmentation du prix des combustibles fossiles et aussi parce que le coût de l'hydrogène ne dépend que pour 1 % (ou moins) de celui de la matière première de base, l'uranium alimentant le réacteur nucléaire.

Il ne faut d'ailleurs pas oublier que la production d'hydrogène par dissociation de l'eau produit une quantité d'oxygène égale à la moitié de celle d'hydrogène et qui pourrait être utilisée de nombreuses manières.

Les problèmes à résoudre sont nombreux. Ils nécessiteront des progrès technologiques importants pour la mise au point à l'échelle industrielle des réacteurs nucléaires à haute température, du cycle d'oxydo-réduction du génie chimique, du système de liaison entre le réacteur nucléaire et l'installation chimique. Ce n'est donc qu'à l'horizon 2000 que l'hydrogène pourrait trouver sa place dans notre économie de l'énergie.

Marie-Jeanne HUSSET

SCIENCE & VIE par les timbres

DANS LE CADRE DE SES COLLECTIONS
DE TIMBRES-POSTE THÉMATIQUES,
SCIENCE ET VIE
A FAIT PARAÎTRE :

LES GRANDES ENERGIES ET LEURS APPLICATIONS

Symbole de la science et du progrès, symbole de la force économique et politique d'un pays, l'énergie devient un véritable drapeau : à défaut de figurer sur l'emblème national, il sera illustré par les timbres. Nombreux sont les pays, notamment ceux du monde oriental, qui ont émis à des fins psychologiques des timbres-poste traitant de leur puissance énergétique. Aussi, comme nous pensons le faire désormais chaque mois, nous mettons aujourd'hui à la disposition de nos lecteurs, 50 timbres sur les différentes formes d'énergie et leurs applications. Dans cette série, nous avons relevé quelques curiosités qui ne manqueront pas d'attirer l'attention tels :

**5 TIMBRES PARMI
LES 50 COMPOSANT LA COLLECTION**



BON DE COMMANDE

A découper ou recopier, et à adresser accompagné de son règlement à Science et Vie, 5, rue de la Baume, 75008 Paris
Veuillez m'adresser votre collection de 50 timbres :

- | | |
|--|---|
| ☐ N° 1 Les Moyens de Transport | ☐ N° 11 Sports et techniques |
| ☐ N° 2 Les Grandes Energies | ☐ N° 12 Les chemins de fer |
| ☐ N° 3 On a marché sur la lune | ☐ N° 13 Les armes |
| ☐ N° 4 Télécommunications | ☐ N° 14 Agriculture (1) |
| ☐ N° 5 L'épopée de l'aviation | ☐ N° 15 Les Savants |
| ☐ N° 6 L'aviation moderne | ☐ N° 16 Les ressources agricoles |
| ☐ N° 7 La Médecine | ☐ N° 17 L'épopée de l'automobile |
| ☐ N° 8 Espace : Les Cosmonautes | ☐ N° 18 Agriculture (3) |
| ☐ N° 9 La marine d'autrefois | |
| ☐ N° 10 La marine contemporaine | |

Je vous règle la somme de 12 F par collection (Etranger 14 F).

☐ C.C.P. 3 volets (sans indiquer le N° de compte)

☐ Chèque bancaire

☐ Mandat poste

A l'ordre de Science et Vie

NOM

ADRESSE

CODE VILLE

DES SOLUTIONS D'AVENIR POUR L'AUTOMOBILE

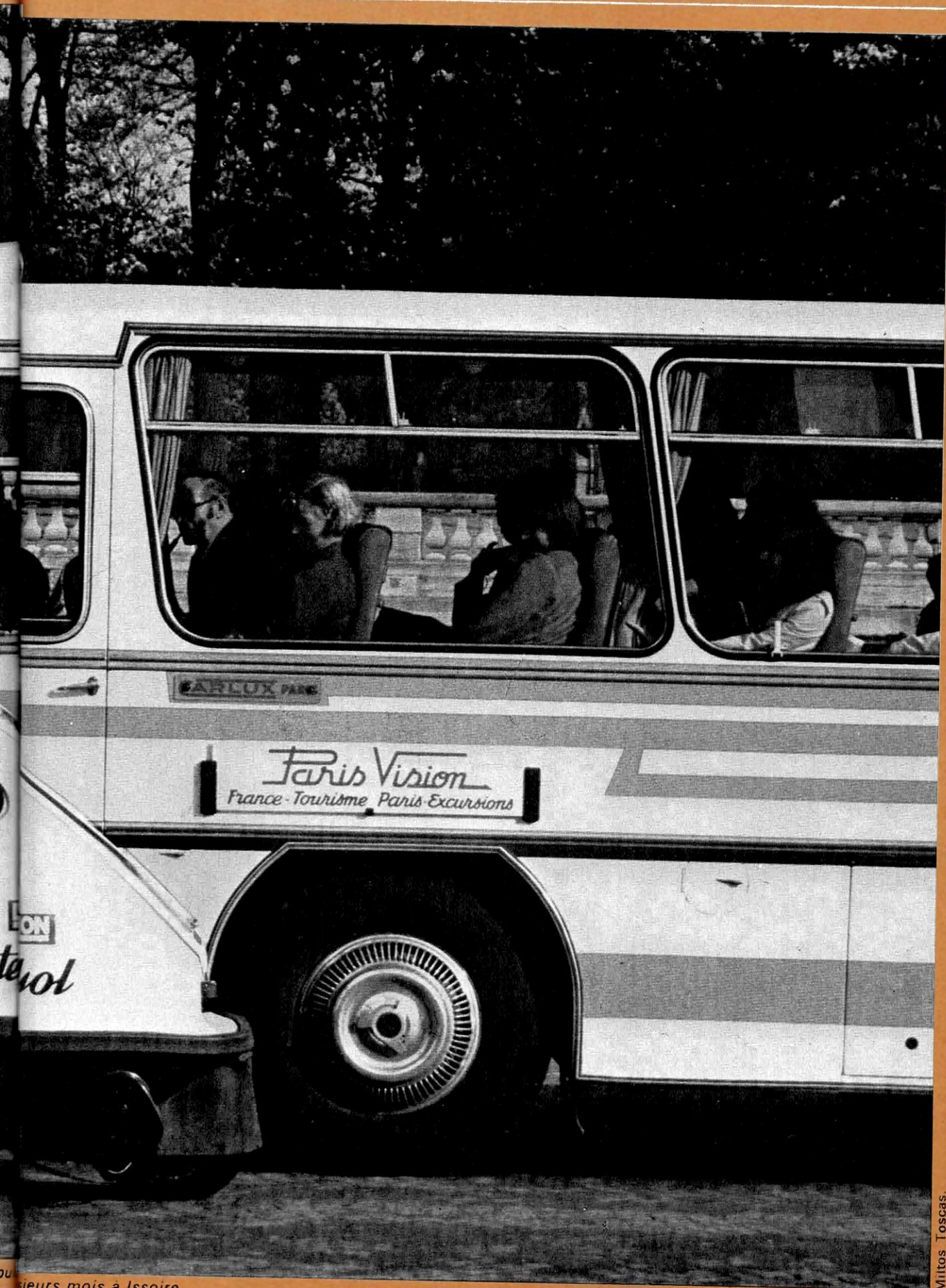
Quelle sera la voiture de demain? Bien malin celui qui pourrait répondre! Mais une chose au moins semble certaine: le bon vieux moteur à explosion alimenté à l'essence semble condamné à plus ou moins longue échéance. Déjà accusé de tous les maux par les défenseurs de l'environnement, il se trouve menacé par la récente escalade des prix du pétrole.

Les constructeurs s'affairent, pressés par l'imminence de l'entrée en vigueur de sévères lois anti-pollution (1975 et 1976 pour les USA et l'Allemagne de l'Ouest) et par le ralentissement des ventes dû à l'augmentation du prix de l'essence. Après avoir analysé en dix ans plus de 300 types de moteurs, General Motors a dépensé en 1973 près de 50 millions de dollars pour les recherches. Au total, la plus grande firme automobile du monde aura consacré un milliard de dollars pour la mise au point d'une voiture « propre ».

Cette voiture propre, Honda semble l'avoir obtenue avec la Honda ESV à admission différenciée (procédé CVCC, Controlled Vortex Combustion Chamber ou chambre de combustion à turbulence contrôlée). Elle est propulsée par un moteur à explosion dont seule la culasse est modifiée. La bougie est placée dans une petite chambre supplémentaire, seule alimentée par un mélange riche, alors que la chambre de combustion principale, elle, ne reçoit qu'un mélange pauvre. Ce procédé permet d'abaisser sensiblement la teneur en produits toxiques des gaz d'échappement, tandis que la puissance n'est que très légèrement diminuée. Volkswagen a également mis au point un moteur avec l'avantage supplé-



La Citadine, 8 batteries 12 V, moteur 4 kW, est construite en série depuis



mentaire de pouvoir l'alimenter avec deux sortes de carburants, essence ou méthanol.

Des carburants nouveaux

Les recherches portent en effet surtout sur les possibilités d'emploi de carburants nouveaux ou d'origine différente, telle par exemple l'essence tirée du charbon. Déjà utilisée en Afrique du Sud, elle a peut-être quelque avenir dans les pays riches en charbon, USA et URSS surtout. Mais pour l'instant, même après l'augmentation des prix du pétrole, l'essence obtenue par le vieux procédé Fischer-Tropsch n'est pas encore compétitive. Plus réalistes à brève échéance semblent être les moteurs au méthanol. Plusieurs prototypes VW, dont une RO 80 à moteur Wankel, fonctionnent déjà au méthanol. L'adjonction de plomb au carburant n'étant pas nécessaire, la nocivité des gaz d'échappement est fortement réduite. Mais si la puissance obtenue est satisfaisante, la faible énergie calorifique du méthanol (3 750 cal/g contre 8 550 pour l'essence) entraîne une consommation double. D'autre part, le démarrage à froid est très difficile.

La turbine à gaz s'accommode bien de n'importe quel type de carburant : essence, kérosène, gas-oil ou même méthanol. Aucun additif au plomb n'est nécessaire puisque la turbine fonctionne de manière continue et ignore donc les problèmes de résistance à la détonation. Bien qu'elle soit à l'heure actuelle peu économique, il semble que la turbine puisse connaître un certain développement d'ici une dizaine d'années.

Propulsion électrique

Cependant, la grosse vedette parmi les « voitures de demain » est sans aucun doute l'automobile électrique. La solution n'est pourtant pas récente. En 1900, 9 voitures américaines sur 10 étaient propulsées à l'électricité. Et Edison affirmait : « on vendra beaucoup plus d'électricité pour les véhicules que pour les lampes ». Ce qui passait il y a peu de temps pour une magistrale bétise pourrait bien s'avérer exact dans quelques années. Un rapport interministériel prévoyait en 1971 (avant la crise du pétrole) que 10 % du parc au-

tomobile français serait constitué par des véhicules électriques en 1985.

Déjà quelques modèles apparaissent sur le marché. Ainsi la « Citadine » de la société Teilhol. Les performances sont modestes : vitesse maximum de 50 km/h et autonomie inférieure à 100 km. Le poids : 610 kg, dont 275 pour les seules batteries. C'est bien là le défaut de toutes les voitures électriques actuelles. Les seules batteries utilisables sont encore les accumulateurs au plomb dont le poids est vraiment excessif. Il faudra attendre la mise au point des accumulateurs zinc-air ou lithium-chlore, au rendement double ou triple, pour que la voiture électrique ait quelques chances de développement. Mais hélas, la commercialisation de ces nouvelles batteries n'est pas attendue avant 1982.

De toutes manières, la voiture électrique, dont la principale qualité est la propreté parfaite, ne peut guère espérer s'imposer que dans les sites urbains et dans les emplois à vitesse réduite. La traction électrique serait ainsi parfaitement adaptée aux véhicules de livraison ou de transports en commun.

Pour ces véhicules destinés à de fréquents arrêts, donc à de grosses pertes d'énergie par freinage, un curieux système peut faire réaliser d'appréciables économies : le volant d'inertie. Le procédé est déjà employé sur des trolleybus de San Francisco. A la station de départ, on lance le volant à grande vitesse (12 000 tr/mn). L'énergie cinétique emmagasinée par la grande masse (1 500 kg) du volant suffit pour entraîner une dynamo qui alimentera le moteur sur une dizaine de kilomètres. D'autant plus que, dans les descentes et au freinage, le moteur joue lui-même le rôle de générateur et relance le volant.

Le moteur à hydrogène

A plus longue échéance, ce sont sans doute les piles à combustibles qui assureront l'alimentation des véhicules électriques. Union Carbide et General Motors, aux Etats-Unis, mènent actuellement de sérieuses études, mais la mise au point ne devrait pas intervenir avant 1990.

D'autre part, puisque les piles à combustibles utiliseront dans un premier temps l'hydrogène comme carburant, un développement

intensif de ce système nécessitera une augmentation considérable de la production d'hydrogène. La propulsion électrique risquerait alors d'être concurrencée par le moteur à hydrogène qui, lui aussi, est parfaitement propre puisque sa combustion ne donne que de l'eau. D'autre part, le pouvoir calorifique de l'hydrogène est près de trois fois plus élevé que celui de l'essence. Enfin, dernier avantage, le moteur peut être de type classique à explosion (à pistons ou rotatif) peu modifié, donc utilisant une technologie éprouvée. Il reste cependant à résoudre le problème du stockage puisque la solution utilisant les hydrures métalliques, la seule valable, n'est pas encore au point.

Il reste encore bien des domaines où l'imagination et le talent des techniciens peuvent s'exercer pour sauver notre vieille automobile. Peut-être en l'an 2000 roulerons-nous dans un véhicule propulsé par un moteur nucléaire ?

Ou bien par un moteur linéaire, sur de grands axes autoroutiers dont la chaussée constituerait l'induit alors que les bobinages placés sous la voiture formeraient l'inducteur ? A moins que nous redevenions sages et redécouvriions... la bicyclette.

A. L.

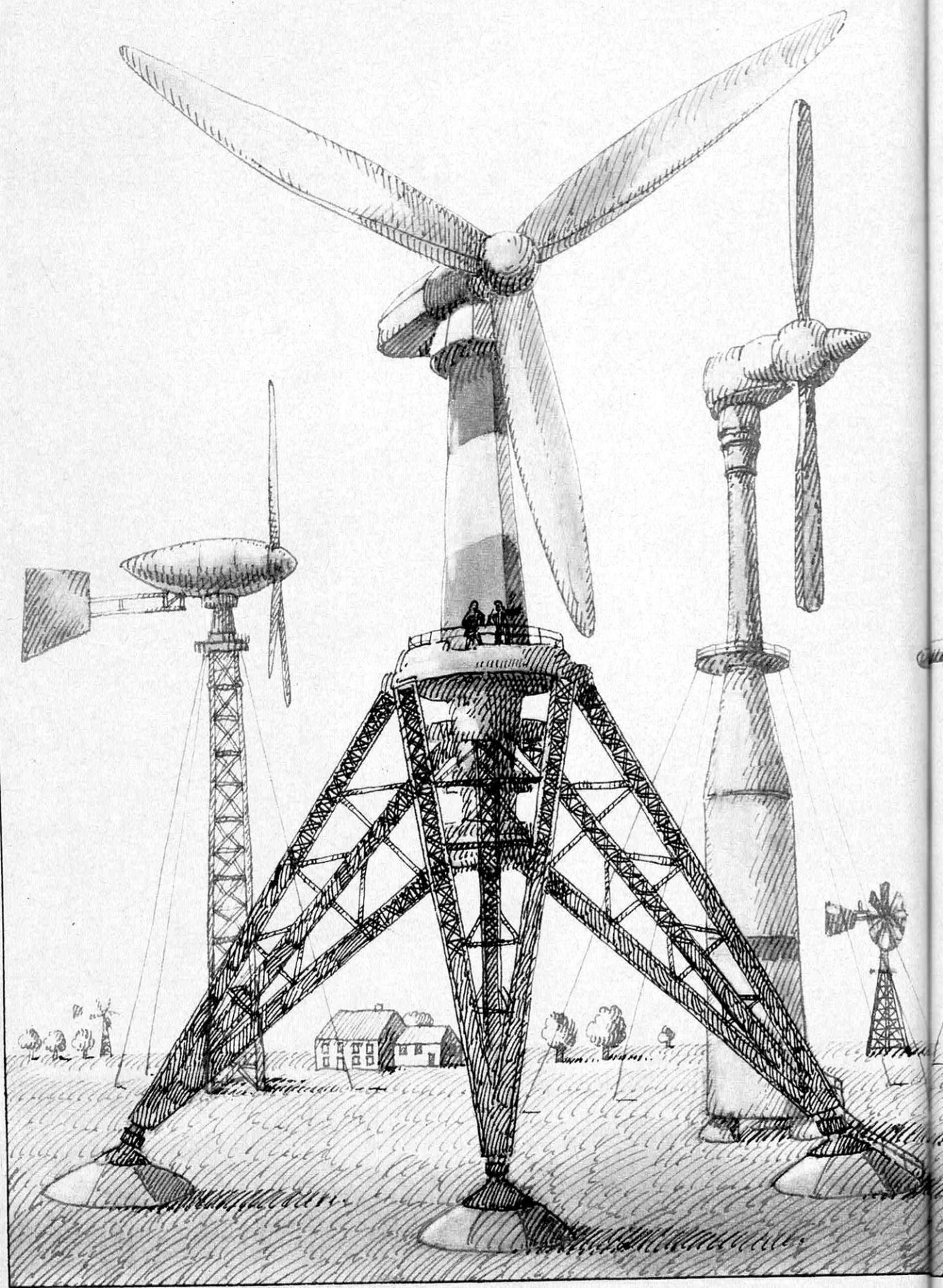
Dans l'état actuel de la technique, l'autonomie des voitures électriques pose un difficile problème. On peut certes rêver au jour où des stations-service spécialisées, dotées de dispositifs de recharge rapide (encore fort coûteux à l'heure actuelle) assureront un travail analogue à celui des pompes à essence aujourd'hui (photo en haut).

Des flottes de véhicules plus ou moins spécialisés résolvant plus facilement le problème.

C'est ainsi que des autobus expérimentés par Man, en Allemagne,

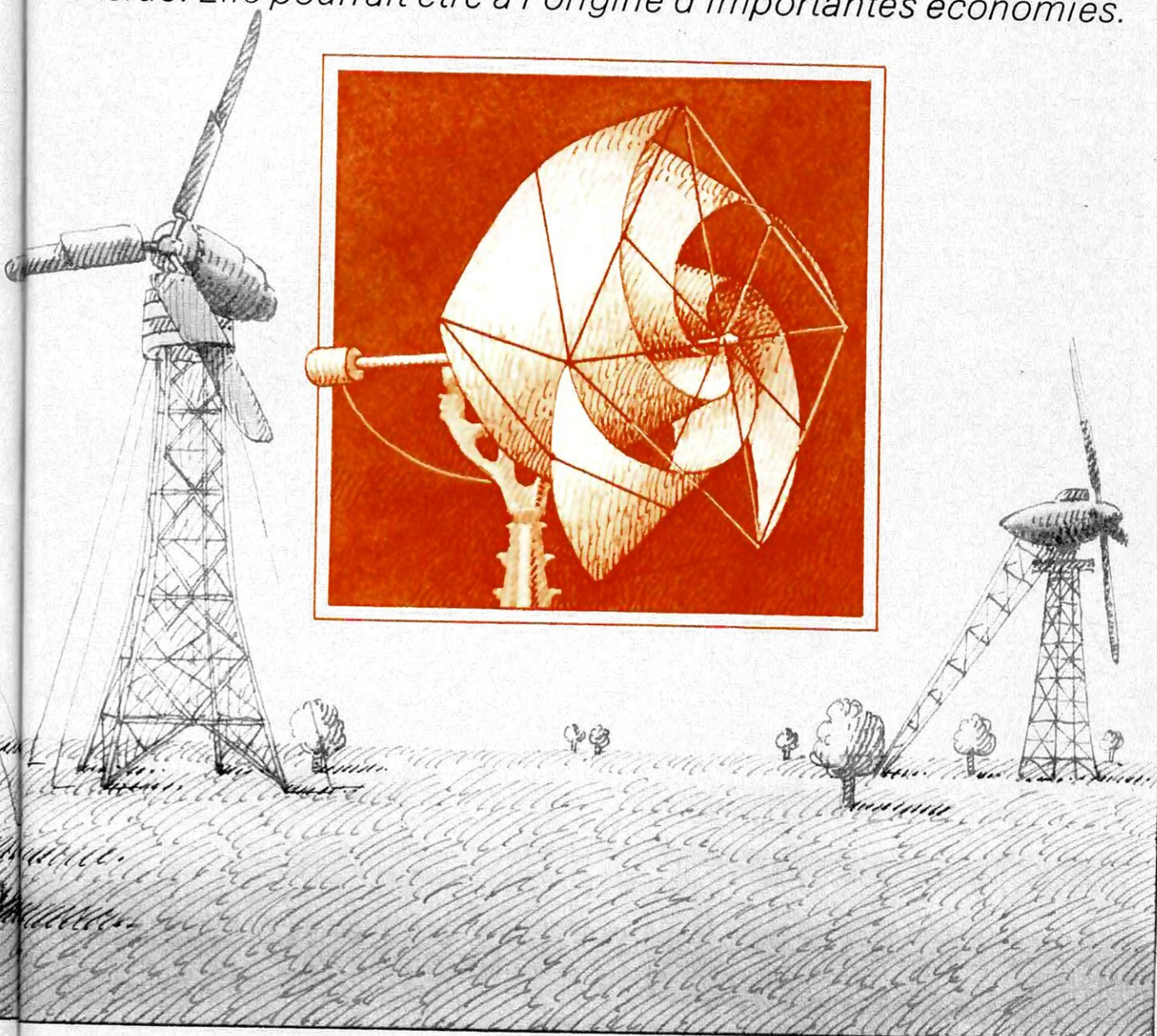
traînent leurs batteries au plomb dans une remorque. Celle-ci peut être rapidement échangée au dépôt.





L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie des vents, utilisée par les bateaux à voile et les moulins hollandais, va-t-elle connaître un renouveau? Le vent, non polluant et gratuit, paraît apporter une solution séduisante au problème des combustibles rares et chers. Malheureusement, son énergie est diffuse et les dispositifs de grande puissance propres à la capter frôlent la démesure. Pour de petites installations, l'alternative ne doit pas être exclue. Elle pourrait être à l'origine d'importantes économies.



De tout temps, Eole, Dieu des vents, a offert à l'humanité une source non négligeable d'énergie. Due à de grandes masses d'air obéissant à de faibles différences de pression, l'énergie éolienne, transformée en énergie mécanique, fut utilisée dès l'antiquité. Captée par des voiles attachées aux vergues d'un mât ou par des roues à pales constituant des moulins, elle a servi à la propulsion des navires ou à l'industrie terrestre.

Grands voyageurs, les anciens, négligeant radeaux et pirogues de l'époque préhistorique, utilisèrent très vite la voile pour propulser leurs navires de commerce. Les voiles, qui par la suite prirent toutes sortes de formes (latines, auriques), n'étaient encore que carrées et limitaient la direction aux vents portants.

De même, les mortiers ou les cylindres roulant sur des pierres plates, utilisés pour moudre le grain, furent remplacés par des moulins, ces tours aux ailes garnies de voiles placées dans la direction du vent et destinées à emmagasiner celui-ci. Les moulins de la Manche, en Espagne, ceux de Hollande ou de Mykonos, derniers symboles de temps révolus, sont autant de signes de l'importance accordée à l'énergie des vents dans le passé. Et il n'est pas rare de rencontrer dans nos prairies quelque ancienne éolienne servant à pomper l'eau d'un puits pour alimenter un abreuvoir. Mais dès le XVIII^e siècle, après Denis Papin, James Watt et la machine à vapeur, d'autres énergies supplanteront celle fournie par le vent.

Les équations fondamentales

Au milieu du XX^e siècle, l'idée vint d'utiliser à nouveau le vent, mais pour produire de l'électricité. Les éoliennes vont naître sous la forme d'aérogénérateurs, dispositifs inspirés du moulin à vent dans lesquels la rotation des pales entraîne un alternateur. Le plus grand et le plus puissant fut construit aux Etats-Unis en 1941. Les deux pales, d'une envergure totale de 53 m, étaient supportées par une tour de quelque 90 m de haut. Le poids total de l'installation atteignait 24 t. L'alternateur, tournant à 600 tr/mn, fournissait un courant de 2 400 V à la fréquence (américaine) de 60 Hz. La puissance atteignait 1 250 kW. L'expérience fut interrompue en 1945 en raison de la fêlure d'une des pales. Elle ne devait pas être reprise.

En France, entre 1958 et 1960, l'EDF étudia un prototype d'aérogénérateur à Nogent-le-Roi. Cette machine, actionnée par une hélice tripale de 35 m de diamètre, fournissait une puissance électrique de 800 kW. Mais le prix de revient de l'installation était relativement élevé pour une production d'énergie plutôt faible. Le pétrole étant très bon marché à l'époque, l'expérience resta sans lendemain.

De tels travaux permirent toutefois, en se basant sur les résultats relevés, d'établir les éléments de base du fonctionnement théorique des aérogénérateurs. Le premier de ces éléments est

que la puissance totale disponible varie proportionnellement au cube de la vitesse du vent.

Il faut noter ensuite que le tiers seulement de l'énergie cinétique du vent traversant la surface balayée par le rotor peut être capté par celui-ci. Et on remarque que l'énergie produite est proportionnelle au carré du diamètre du rotor.

Le rendement, lui, s'accroît en même temps que la vitesse de rotation du rotor, et se trouve à son maximum lorsque la vitesse de l'extrémité des pales est de six à huit fois plus grande que la vitesse du vent. Enfin le coût d'un aérogénérateur augmente, en général, dans le même rapport que le cube du diamètre du rotor.

Les modèles commercialisés

Depuis septembre 1973, le prix du pétrole a quadruplé. L'énergie importée déséquilibre la balance des paiements des pays industrialisés. Dans tous les domaines, il faut économiser.

Certains pensent, alors, que le vent pourrait bien donner, simplement et sans bourse délier, ou si peu, un appoint intéressant. Appoint seulement, car les principes de fonctionnement, précédemment énoncés, montrent que l'énergie produite augmente moins vite que le coût des investissements.

Les machines de grande taille semblent donc, dans l'état actuel des connaissances, être condamnées. Il est peu vraisemblable que le réseau EDF ou les grosses industries soient, demain, alimentés en électricité par des batteries d'éoliennes. Pour fournir les 1 000 MW correspondant à la puissance d'une centrale nucléaire, il faudrait d'ailleurs plus d'un millier d'aérogénérateurs semblables au prototype de Nogent-le-Roi.

Si l'exploitation de l'énergie éolienne semble exclue au niveau national, elle paraît toute indiquée et simple à mettre en œuvre sur le plan local ou au niveau de la maison individuelle.

Aux Etats-Unis, où se pose le problème de l'alimentation en électricité des régions éloignées, est commercialisée toute une gamme de systèmes dont la puissance varie de 200 à 6 000 W. Le modèle de 200 W, d'un diamètre de 2 m, est vendu 565 dollars, soit environ 2 800 francs. Il permet de disposer de 20 kWh par mois si la vitesse du vent est en moyenne de 16 km/h. Cet appareil est associé à une batterie de 270 Ah, comme secours en cas de chute du vent. Si, par exemple, durant cinq jours, le vent ne souffle pas, on pourra tout de même disposer de 54 Ah par jour.

D'autre part, pour éviter les vitesses de rotation excessives qui risquent de détruire la machine, le rotor est conçu de telle sorte qu'il se débraye si la vitesse du vent dépasse 36 km/h.

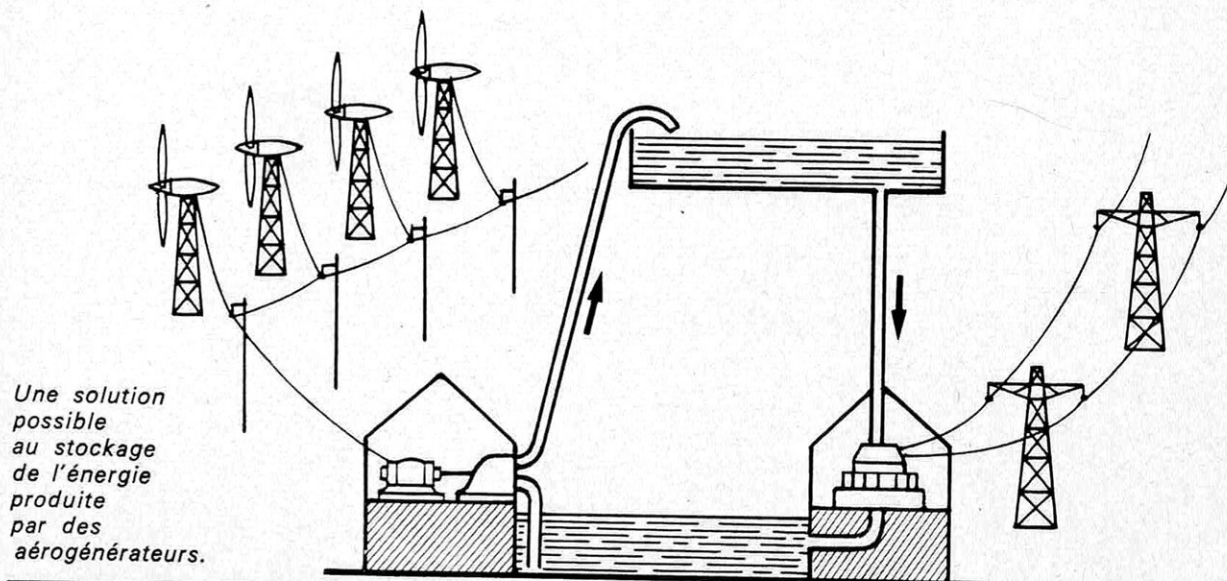
Le système de 6 000 W, qui, dans les mêmes conditions météorologiques, fournit 325 kWh, permet de satisfaire la grande majorité des besoins d'une habitation moyenne. Il vaut un peu plus de 50 000 francs.

En France, seule une petite société, Aërowatt, s'est lancée dans la construction d'aérogéné-



Magnum.

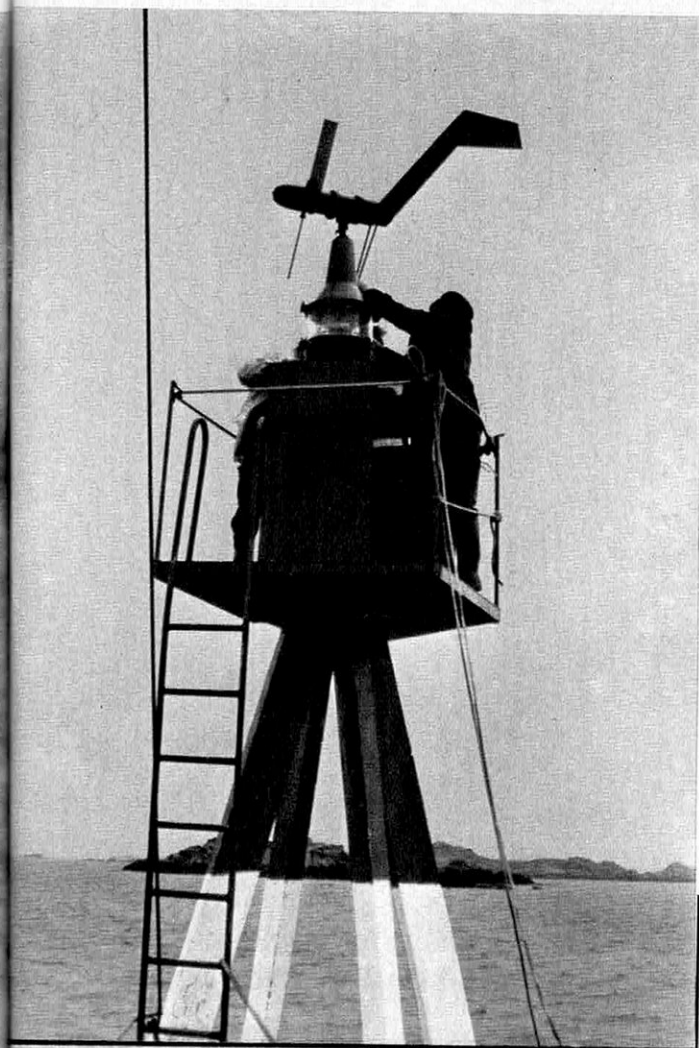
L'utilisation de l'énergie des vents est liée aux civilisations les plus anciennes.





Au cours des vingt dernières années, un certain nombre d'éoliennes évoluées, capables de fournir du courant en quantités importantes, furent expérimentées en France par l'E.D.F. A une époque où le pétrole était imbattable, ces recherches n'eurent

pas de suite. En page de droite, deux types d'éoliennes actuellement construites par la société française Aéro-watt: En haut, un engin de puissance 24 W alimentant une balise marine. En bas, l'éolienne alimentant le phare de Faraman.



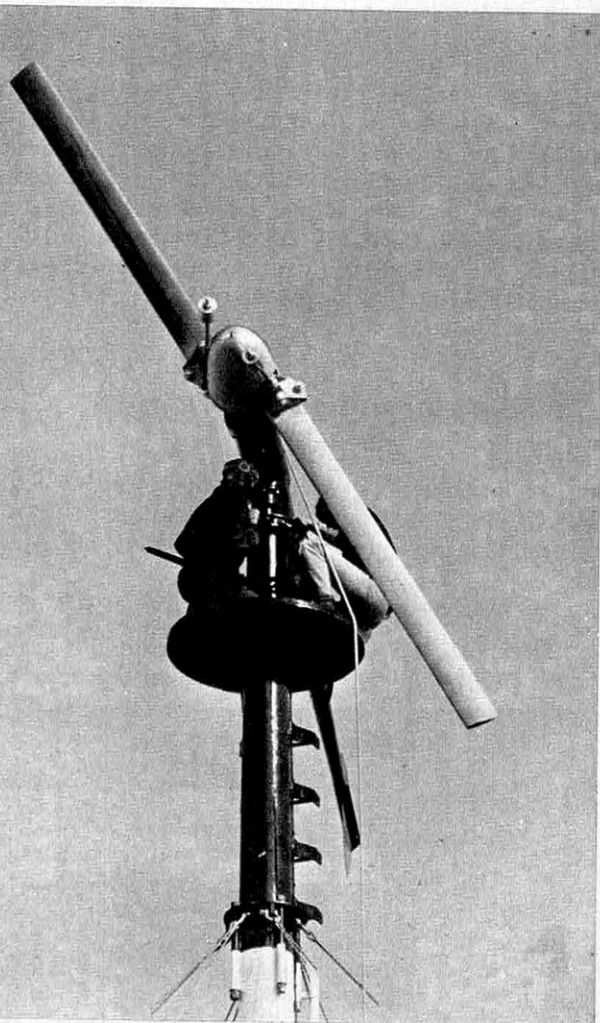
rateurs. Dans la gamme d'appareils qu'elle propose, on trouve des dispositifs dont la puissance est comprise entre 24 et 4 100 W. Pour l'instant, la majorité des installations réalisées servent à l'alimentation en électricité de stations isolées automatiques (phares, balises, ou relais de télécommunications).

Ainsi le courant de la station radio-téléphonique de Créolière-les-Neiges, dans les Alpes-Maritimes, est fourni par un appareil de 350 W. De même, le feu de signalisation de la Crabière, aux îles Chausey (dans la Manche), et le phare d'atterrissage de Faraman, en Camargue, sont alimentés respectivement par des aérogénérateurs de 24 et 1 100 W.

Des principes originaux

L'originalité des recherches de la société Aérowatt réside dans l'étude et la mise au point d'un dispositif de calage variable du rotor. Celui-ci permet à la machine de supporter des vents de très grande vitesse, de l'ordre de 56 m/s (plus de 200 km/h), voire 90 m/s (325 km/h) sans difficulté et sans aucune intervention humaine.

L'hélice entraîne, directement ou par l'intermédiaire d'un système mécanique, un générateur électrique constitué par un alternateur à aimants permanents.



Si l'on veut alimenter une installation électrique avec un aérogénérateur, il est indispensable de prévoir un convertisseur et une batterie d'accumulateurs pour stocker l'énergie électrique et permettre l'alimentation avec un courant d'intensité constante. Si la station est surveillée ou fréquemment visitée, on peut se contenter d'accumulateurs au plomb semblables à ceux utilisés pour le démarrage des camions. Si le système est à fonctionnement entièrement automatique, il devient préférable de se servir de batteries de type stationnaire, mises au point pour les P et T. Elles ont une durée de vie beaucoup plus longue que les batteries « mobiles », et disposent d'une réserve d'électrolyte qui leur permet de supporter une longue période d'évaporation.

Lorsque l'énergie quotidiennement absorbée par l'installation dépasse 1 kWh, il est préférable d'adjoindre au système un groupe électrogène à démarrage et arrêt automatique. Ce dernier fournira l'énergie nécessaire à la charge de la batterie au cas où l'absence de vent se prolongerait plusieurs jours.

Conçus pour supporter toutes les conditions climatiques, les aérogénérateurs de conception française commencent à être demandés par les pays désireux d'équiper des stations automatiques. Pour satisfaire cette clientèle de plus en plus nombreuse, on s'est efforcé de perfectionner le système, en s'inspirant des techniques employées dans l'aviation. Ainsi, le givrage des pales s'avérant dangereux pour la machine, le rotor a été calculé afin de résister à l'effet de balourd dynamique résultant de l'existence d'une couche de glace de 30 mm d'épaisseur sur une seule des deux pales. Les parties tournantes de la machine sont d'ailleurs enduites d'une couche de téflon qui empêche la glace d'adhérer. Lorsque l'aérogénérateur est, au contraire, destiné à des pays où il y a risque de vent de sable, le rotor est recouvert d'une feuille de néoprène qui le protège de l'érosion.

Les nouveaux concepts

Seules à être réalisées de façon semi-industrielle, ces machines, encore semblables de par leur principe aux moulins à vent classiques, ne doivent pas faire oublier l'existence d'autres projets.

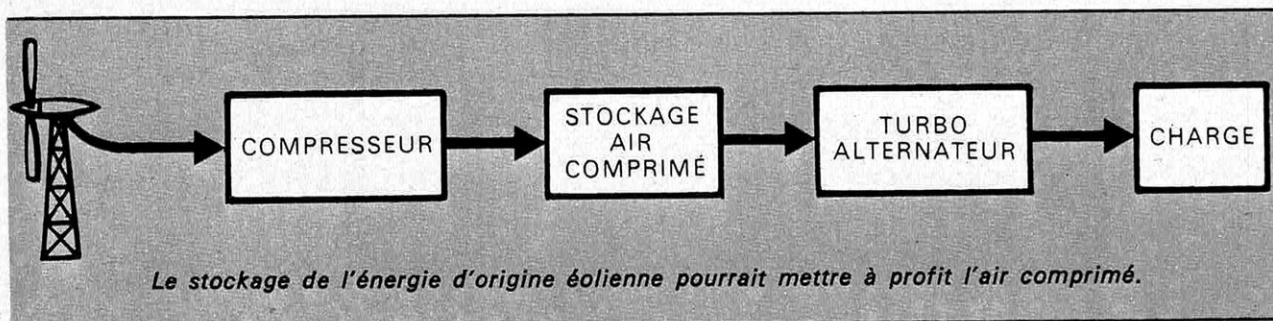
Une première tendance, assez proche des systèmes existants, consiste à concevoir des aéro-

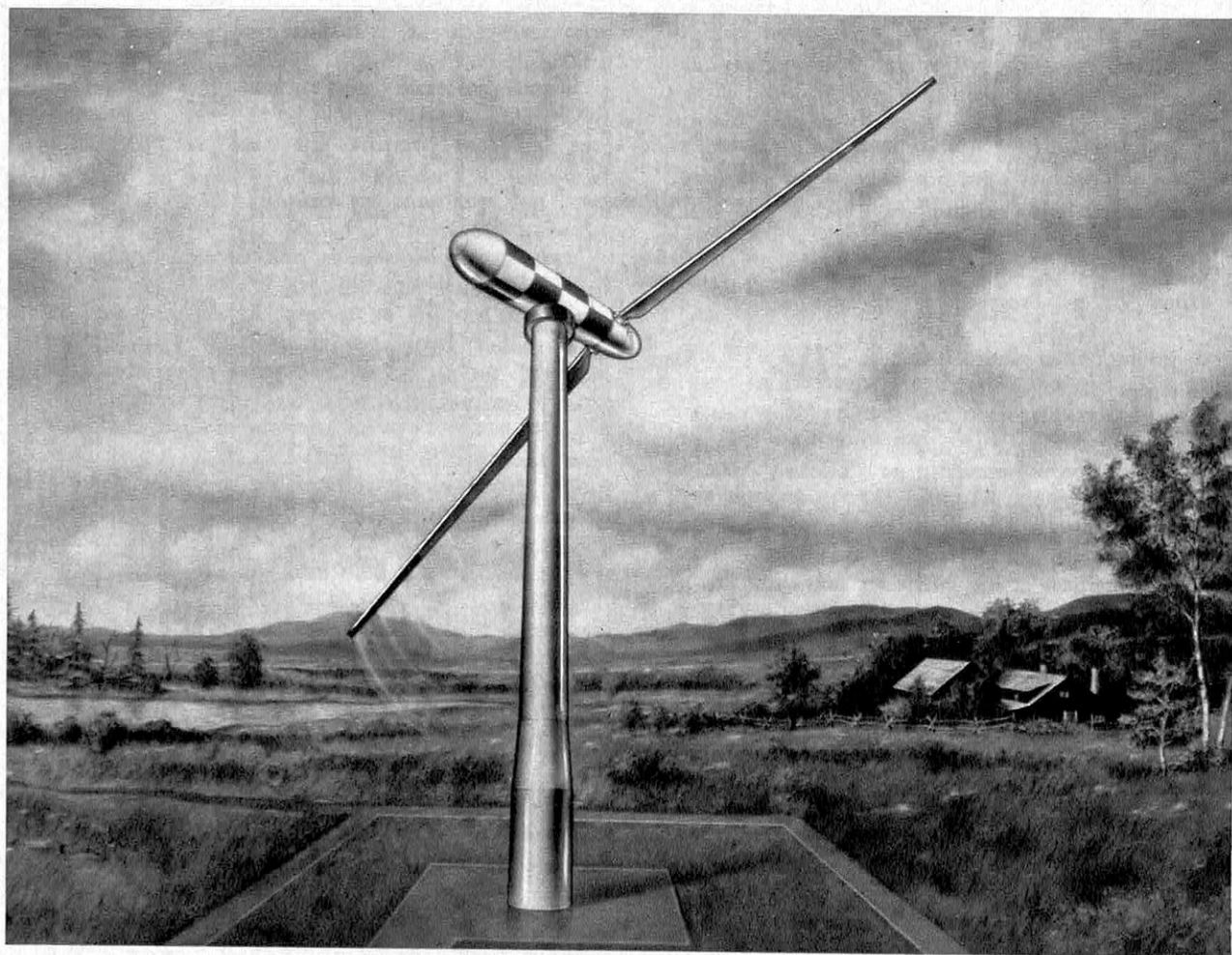


Le Sailwing de Grumman, à pales semi-rigides.

générateurs dont le rotor est à axe vertical. Les maquettes et prototypes, dérivés des brevets de Savonius et Darieux, présentent l'avantage d'être mis en mouvement quelle que soit la direction du vent. Ils ne sont d'ailleurs pas sensibles aux inversions de sens du vent, ce qui évite l'emploi d'un système directionnel du type gouverne ou dérive, comme celui des aérogénérateurs à axe horizontal.

Le système Savonius, dont le brevet a été déposé en Finlande en 1929, comporte un rotor constitué de deux ou trois surfaces courbes (aubes) fixées à l'axe de rotation le long d'une génératrice. L'augmentation du nombre de ces surfaces permet un démarrage de l'ensemble par vents faibles, mais augmente en revanche l'inertie.





Un projet d'éolienne de 100 kW devant être expérimenté par la NASA vers la fin de 1975.

Le brevet de Darrieux, déposé en France en 1931, prévoit un rotor constitué de lames courbes fixées par leur extrémité à l'axe de rotation. Un prototype employant ce principe a été construit aux États-Unis par la NASA. En bois, recouvert de matière plastique et renforcé par de la fibre de verre, il fournit, par un vent de 24 km/h, une puissance de 1,3 ch. Démarrant par lui-même, avec un vent de 19 km/h, il acquiert une vitesse de rotation qui se stabilise à 13 tr/mn. Mais si on lance le rotor à la main à 65 tr/mn, la vitesse se stabilise à 213 tr/mn.

Actuellement, des études sont entreprises sur ce type de rotor par le National Research Council du Canada. Elles visent à déterminer le profil des lames et la courbure qu'il convient de leur donner afin d'éliminer les pertes d'énergie dues aux forces de tension.

Le générateur de cyclones

Quoique différents des aérogénérateurs précédemment étudiés, ces dispositifs restent, cependant, basés sur l'éternel principe du moulin à vent.

Un ingénieur français, M. Edgar Nazare, s'orientant dans une direction totalement différente, propose une solution nouvelle pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Il s'agit de la cons-

truction de « générateurs de cyclones artificiels » à partir desquels il serait possible de capter l'énergie cinétique pour la transformer en énergie électrique.

Le « cyclone artificiel » serait produit dans une cheminée présentant un étranglement au tiers environ de sa hauteur. Cette tour, en forme de tube de Venturi, comporterait à sa base une « plate-forme thermique » en dessous de laquelle l'air, relativement chaud au niveau du sol, serait canalisé. Grâce au tirage de la cheminée, l'air s'élèverait en tourbillonnant vers les couches plus froides en hauteur. Une turbine, située au niveau du rétrécissement de la cheminée et actionnée par le courant d'air, fournirait de l'électricité.

Pour parvenir à ces résultats, plusieurs conditions devraient être satisfaites. La tour serait la plus haute possible (300 m au minimum, mais 600 m serait selon M. Nazare, la hauteur souhaitable) et, puisque le volume d'air aspiré dépend de l'ensoleillement, il faudrait que la surface au sol (200 à 300 ha) soumise à cet ensoleillement ne comporte ni végétation, ni habitations.

Les tours devraient donc essentiellement être construites dans des régions désertiques. Au Sahara, une tour de 450 m de haut fournirait une puissance de 500 à 1 000 MW (l'équivalent d'une centrale nucléaire) durant les heures moyennement chaudes de la journée. Cependant,

en période nocturne, le système ne pourrait produire qu'une puissance limitée. Pour pallier cet inconvénient, Edgar Nazare propose la construction d'une chaîne de tours suivant le même parallèle, en direction Est-Ouest, pour tirer profit du décalage horaire. Les tours interconnectées permettraient une distribution continue d'électricité pendant la nuit.

Tous les mérites ou presque

La solution des générateurs de « cyclones artificiels » est extrêmement séduisante, mais conduirait à des installations d'une taille gigantesque. Cette démesure est parfaitement logique, car l'énergie éolienne, comme l'énergie solaire, est diffuse. Dans l'état actuel des connaissances, toute installation destinée à produire une grande puissance sera toujours, quel que soit le principe utilisé, d'une taille hors du commun. Mais si on ne désire recueillir que des puissances moyennes, l'énergie du vent offre un certain nombre d'avantages.

Quelle que soit la manière dont on l'utilise, elle est toujours gratuite et totalement inépuisable. Le coût d'une centrale éolienne se limite à l'investissement nécessaire à la construction, auquel il convient d'ajouter les frais de maintenance. Ceux-ci sont cependant relativement restreints, grâce à la simplicité mécanique des installations.

D'autre part, l'utilisation du vent comme source d'énergie préserve des surprises consécutives à une hausse anarchique des matières premières dont on connaît, après l'exemple pétrolier, les conséquences catastrophiques sur l'économie mondiale.

En ce qui concerne la pollution, l'énergie éolienne ne produit aucun résidu toxique d'aucune sorte. Voilà donc une source d'énergie qui ne contribue en rien à la dégradation de l'univers ! Aucun phénomène nouveau, qu'il soit simple ou complexe, n'est mis en œuvre pour la

produire. Elle se contente de capter les vents existants. Certes, sur le plan de l'esthétique, les paysages peuvent se trouver légèrement défigurés. Mais ces moulins à vent, qui, au demeurant, peuvent prendre un caractère pittoresque, ne sont pas plus laids que les tours de réfrigération que tiennent à imposer les partisans du « tout nucléaire ».

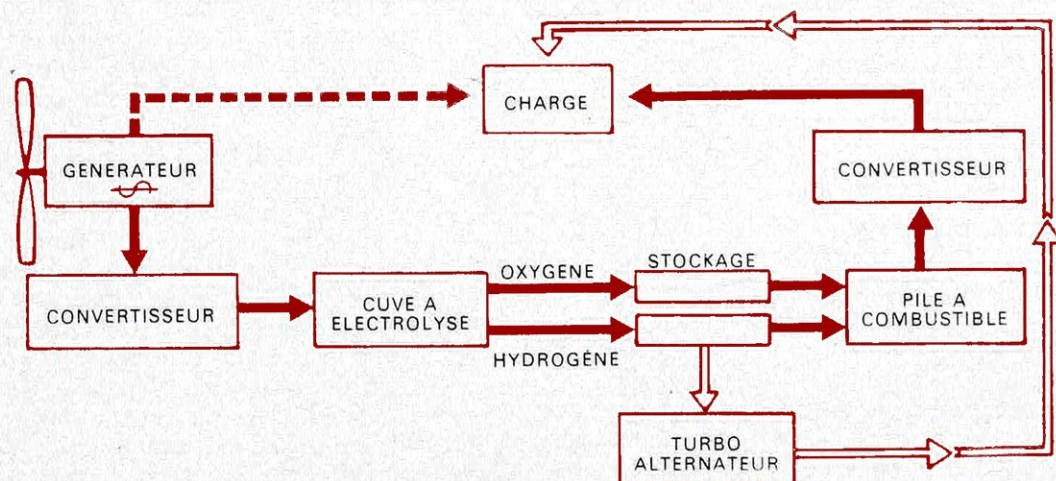
Naturelle, illimitée et peu onéreuse, l'énergie éolienne a aussi ses défauts. Elle est incertaine et discontinue dans le temps. La vitesse du vent peut varier brusquement de zéro à quelques dizaines de kilomètres à l'heure dans les cas les plus courants. Comme l'énergie hydraulique, elle est issue d'un phénomène aléatoire. On ne peut prévoir s'il pleuvra dans huit jours. De la même façon, il est impossible de déterminer s'il y aura du vent.

Mais si, dans le cas de l'énergie hydraulique, il est assez simple d'ajouter au stockage naturel d'énergie, constitué du relief et de la vitesse moyenne d'écoulement des eaux, un stockage artificiel par la création de barrages, le problème est moins simple pour le vent.

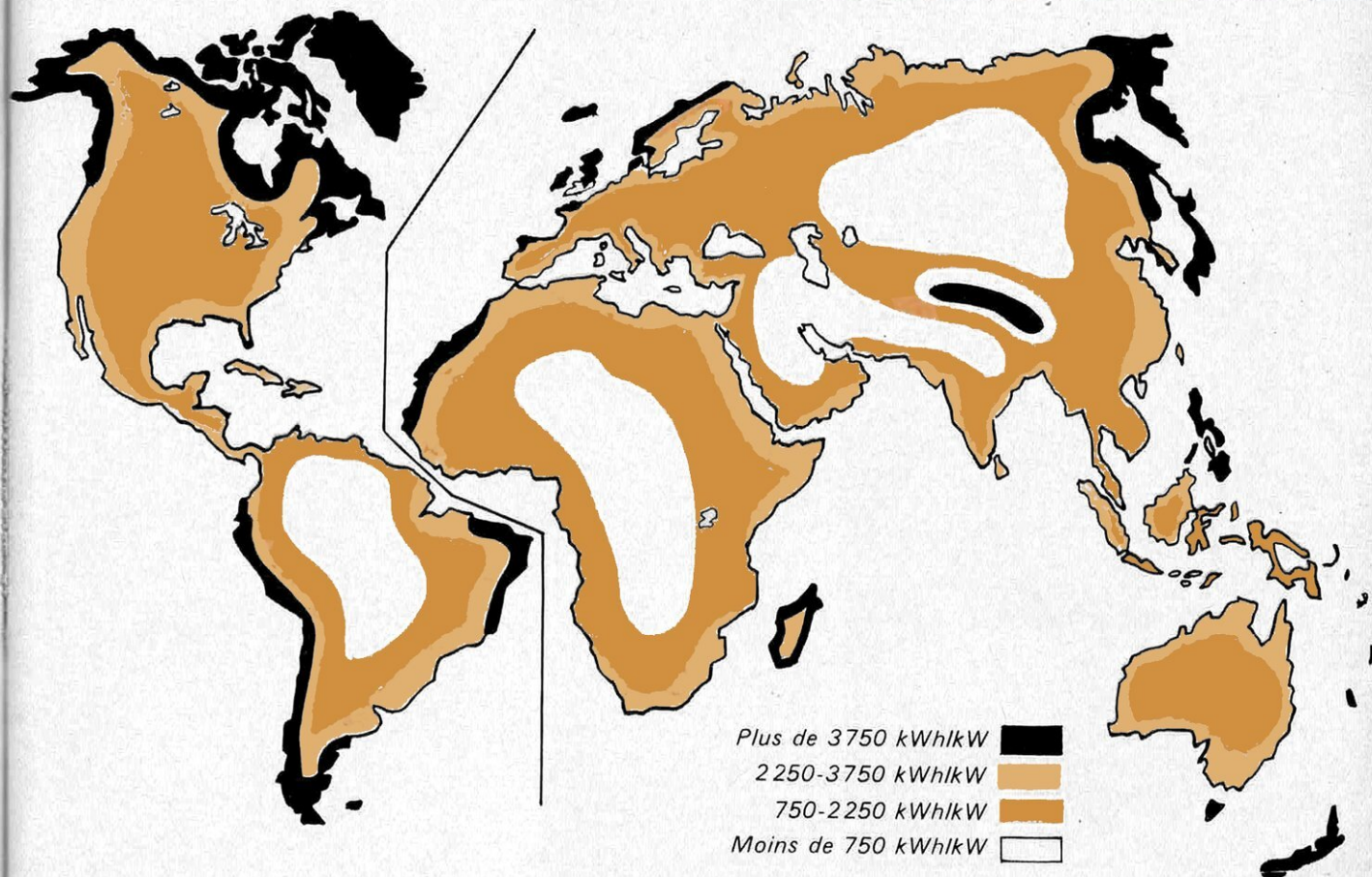
Problèmes de stockage

Bien que les résultats statistiques, provenant de l'observation d'un site donné pendant plusieurs années, aient montré que l'énergie moyenne annuelle du vent ne subissait qu'une variation de l'ordre de 20 %, il est nécessaire de prévoir un système de stockage. La solution la plus simple, et la seule employée à l'heure actuelle, consiste à emmagasiner l'électricité dans des accumulateurs au plomb. Ceux-ci constituent un stock tampon d'énergie de la même façon qu'une batterie d'automobile soumise à des charges et décharges successives. Mais les accumulateurs sont relativement chers pour une utilisation de moyenne importance et il faut envisager d'autres formes de stockage.

L'énergie électrique produite à partir du vent



Autre solution pour le stockage et le transport de l'énergie, le passage par l'hydrogène.



On connaît bien les régions du monde les plus favorables à l'implantation des aérogénérateurs.

peut servir à décomposer de l'eau par électrolyse en produisant de l'oxygène et de l'hydrogène. Ce dernier serait alors utilisable soit dans une turbine à gaz, soit dans une pile à combustibles. Il est possible aussi d'envisager des systèmes mécaniques. En particulier le stockage de l'énergie par gravité. L'électricité produite actionne une pompe qui élève l'eau dans un réservoir, l'énergie potentielle acquise par l'eau pouvant être récupérée à la demande par un turbo-alternateur générateur d'électricité.

Cependant l'irrégularité de la vitesse des vents pose un autre problème. La puissance développée étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, il y a antagonisme entre le désir de construire une machine qui fournisse de l'énergie lorsque la vitesse du vent est faible, et qui ne soit pas détruite lorsque cette vitesse devient trop forte. Il faut alors que la surface active de l'hélice puisse diminuer lorsque la vitesse du vent augmente. Dans les moulins à vent on supprimait les voiles des ailes. Quant aux aérogénérateurs, ils sont munis soit d'une hélice vrillée dont le rendement est faible aux grandes vitesses, soit d'une hélice à pas variable, soit du système à calage variable (breveté par Aéro watt).

Bien que complexes, les problèmes techniques posés par la conception des aérogénérateurs sont, dans leur champ d'utilisations possibles,

résolvables et résolus. Actuellement l'énergie éolienne est une réalité qui, si elle ne peut subvenir à la totalité des besoins en énergie d'un pays, est capable cependant de fournir un appoint non négligeable. Une étude de la NASA effectuée en 1972 révèle dans ses conclusions que près de 20 % de la consommation en énergie des Etats-Unis en l'an 2000 pourraient être fournis par l'énergie éolienne. Bien qu'aucune enquête officielle n'ait été réalisée en France, il est certain que des résultats à peu près similaires devraient pouvoir être obtenus.

Il est vrai que, depuis plus de dix ans, EDF a totalement abandonné les études sur l'énergie éolienne. Les seules réalisations accomplies dans ce domaine sont le fait de petites sociétés ou d'artisans.

Un récent concours organisé par l'ANVAR (Agence nationale de valorisation de la recherche) a permis de recenser un certain nombre de systèmes fort ingénieux. Une politique d'aide aux constructeurs permettrait à ceux-ci de lancer de petites séries. Un aérogénérateur pouvant subvenir aux besoins d'une maison individuelle devrait voir son prix se situer aux alentours de 2 500 à 5 000 F.

Quelle économie pour les particuliers et pour l'Etat !

Daniel PASERI

ÉNERGIE ET RÉCUPÉRATION DES DÉCHETS

« Si, en France, toute l'énergie contenue dans les résidus urbains était transformée en électricité, les kWh produits représenteraient environ 10% de la consommation moyenne domestique ». Telle est la constatation d'un spécialiste. M. Defeche, directeur du traitement industriel des résidus urbains à l'Electricité de France. Prononcées au cours d'une conférence, quelques semaines avant la « guerre du pétrole », ces paroles prennent aujourd'hui une valeur nouvelle.

Inutile d'insister sur les bouleversements apportés dans l'économie mondiale par les hausses rapides du prix de l'énergie. Ils ont mis en vedette les problèmes du recyclage, de la récupération, ou encore de l'exploitation de nouvelles sources d'énergie. Cela, après la prise de conscience que les réserves pétrolières de la terre ne sont pas inépuisables. Et si, dans la plupart des pays industrialisés, l'énergie nucléaire soulève à la fois espoir et crainte, on ne saurait négliger plus longtemps le potentiel énergétique que représentent les déchets ou résidus urbains.

Rappelons quelques données chiffrées. Cinquante millions de Français produisent plus de 11 millions de tonnes d'ordures ménagères par an. Environ 80% sont collectés (9 mil-

lions de tonnes environ). Sur ce total, 70% sont mis en décharges (6 millions de tonnes); 20% sont incinérés (2 millions de tonnes) et 10% sont compostés (1 million de tonnes).

Deux, parmi ces « finalités », ne suscitent guère de discussions. La décharge peut aider à remodeler un sol, à l'emplacement d'anciennes carrières, par exemple. Le compostage permet d'apporter un surplus nutritif pour les cultures ou les plantations.

L'intérêt de l'incinération a été, par contre, assez débattu. Selon un spécialiste des problèmes de déchets « c'est consommer de l'énergie pour faire de la fumée ». Il faut pourtant rappeler qu'il y a plus de 50 ans, des usines électriques utilisant des déchets fonctionnaient à Paris. L'une d'elles alimentait en électricité les installations municipales de pompage d'eau. Il est donc temps, dans la conjoncture actuelle, de repenser ce point.

Trois questions principales viennent à l'esprit :

- quel est le pouvoir calorifique des déchets urbains ?
- comment récupérer l'énergie ?
- quel peut être le coût de cette récupération ?

Un problème de calories

D'après les mesures qui ont été effectuées jusqu'à présent dans la plupart des pays dits

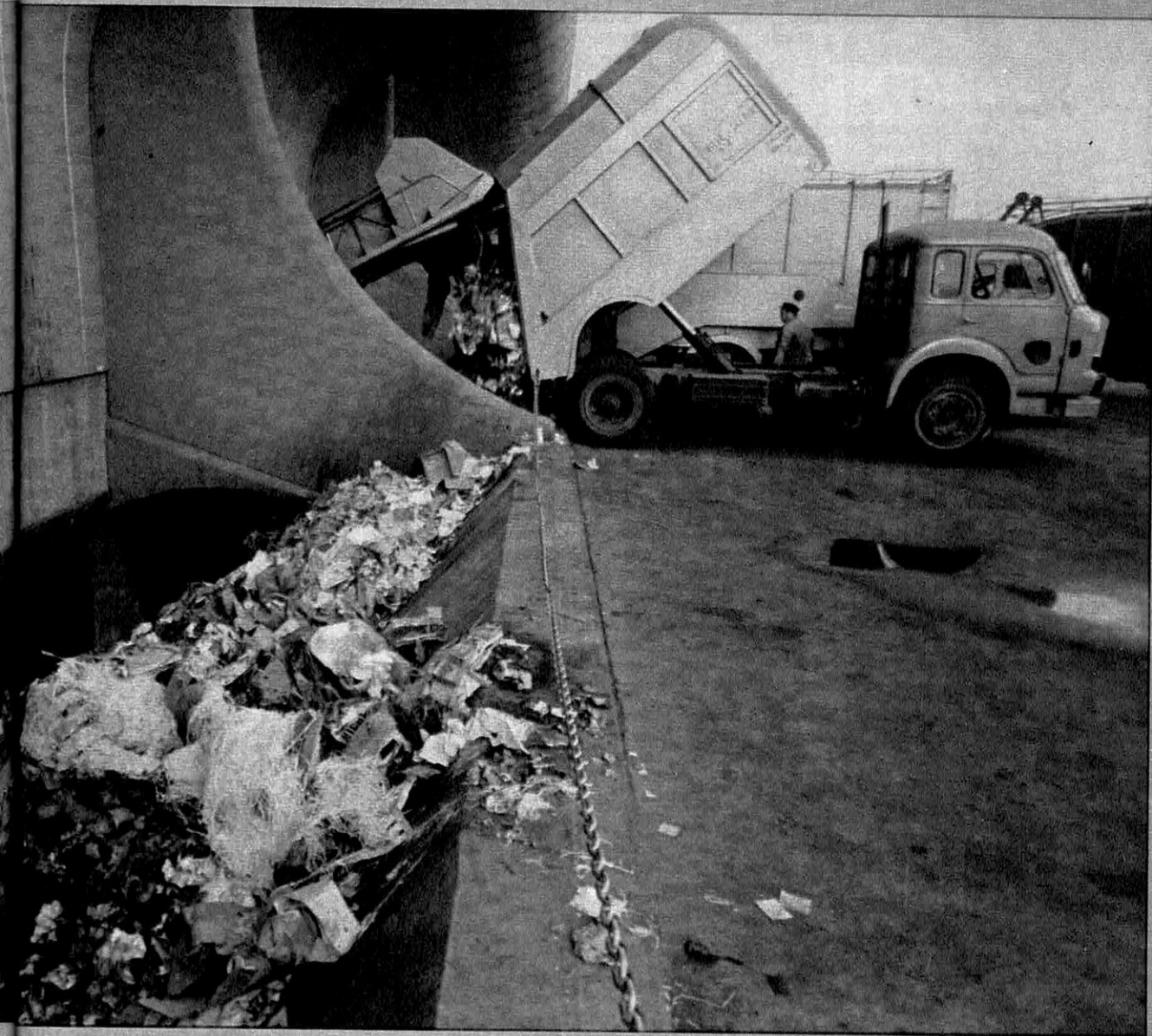
La combustion des déchets pour produire

industrialisés, il apparaît que, pour les résidus, les valeurs minimales du pouvoir calorifique sont comprises entre 1 500 et 2 200 mth/kg⁽¹⁾.

Ces chiffres peuvent paraître faibles. Ils le sont moins si l'on se souvient qu'il existe en de nombreux pays (Allemagne de l'Est par exemple) des centrales thermiques fonctionnant avec du lignite. Et le lignite a des valeurs calorifiques minimales comparables à celles des déchets urbains.

Cela paraît plus qu'encourageant. Un handicap cependant ne doit pas être passé sous silence. Les résidus urbains

(1) mth : millithermie.



• la chaleur destinée au chauffage urbain ou de l'électricité n'est pas vraiment une nouveauté.



Photos Jean Marquis.

sont, contrairement au lignite, d'une grande hétérogénéité. Il s'agit donc, en fait, au travers des procédures techniques à mettre en œuvre, d'obtenir une certaine homogénéité dans la production d'énergie.

L'évolution actuelle, en quantité et en qualité, des déchets, va heureusement dans le sens de cette exigence. On note, par exemple, que dans le schéma d'une croissance économique (même réduite), la quantité de rejets par habitant croît à peu près dans le même rapport que l'augmentation annuelle de la population. Les déchets urbains tendent donc à accroître leur valeur par le biais de quantités croissantes.

La deuxième remarque est d'ordre qualitatif. La composition des déchets montre que les papiers, cartons et plastiques y prennent une part de plus en plus grande au détriment des produits végétaux. La valeur énergétique s'en trouve renforcée (les papiers et autres plastiques ont des pouvoirs calorifiques élevés : environ 3 500 mth/kg pour les premiers et de 6 000 à 10 000 mth/kg pour les seconds).

Cet aspect positif est cependant tempéré par les initiatives actuelles allant vers un recyclage intensif des matières premières. Ce recyclage, en enlevant le maximum de papier ou de plastique aux résidus, diminue sensiblement leur pouvoir énergétique. Il y a là un « cercle vicieux » dont on ne voit pas encore tous les moyens de sortir.

Et la pollution ?

On peut se demander aussi si l'utilisation des déchets dans la production d'électricité n'est pas plus polluante pour l'air que l'utilisation de combustibles fossiles.

D'après les analyses, il apparaît qu'il n'en est rien concernant le soufre. Les résidus urbains en contiennent nettement moins que le charbon ou le mazout. Par contre, la teneur en composés chlorés est en général supérieure. Cela pourrait nécessiter des installations de retenue du gaz chlorhydrique. Mais il semble qu'une bonne partie des composés du soufre et du chlore est retenue dans les cendres et

n'apparaît pas dans les gaz émis, contrairement à ce qui se passe avec les combustibles fossiles. Reste à considérer les émissions d'oxydes d'azote, d'hydrocarbures, d'oxyde de carbone et de poussières. Il semble que, par l'utilisation appropriée de bonnes techniques (feux bien conduits, dépoussiéreurs électrostatiques), il n'y ait pas de différences notables entre les divers combustibles employés.

Le bilan pollution de l'air apparaît donc concluant, comparé bien sûr aux autres sources les plus couramment utilisées jusqu'ici.

Le rendement des chaudières

Il s'agit maintenant de déterminer les méthodes de récupération d'énergie de la combustion de ces résidus urbains. Si l'on sait obtenir un débit calorifique sans variations importantes malgré l'hétérogénéité des résidus, les points les plus délicats à résoudre relèvent de l'encrassement et de la corrosion des tubes de surchauffeurs.

Des expériences, réalisées en particulier dans une chaudière d'incinération à Paris, ont montré le rôle de la température des gaz dans la chambre de combustion sur la corrosion des tubes. Pour obtenir une corrosion très réduite, il faut maintenir une température inférieure à 800° et une vitesse des gaz relativement faible. Ces derniers critères mettent en évidence, en quelque sorte, les limites de l'utilisation des résidus urbains comme combustibles. Dans le cas où ceux-ci sont utilisés comme principale source pour produire de l'électricité, la limitation à 800 °C des gaz de combustion n'autoriserait des rendements industriels des chaudières que d'environ 70 %.

Une amélioration peut être apportée si les déchets viennent en appoint à des combustibles plus riches. La ville de Munich offre différents types de réalisations de cette nature.

Le prix de l'opération

Il reste à répondre à la troisième question : quel est le coût de cette forme de récu-

pération ? Plusieurs éléments entrent en jeu. Le premier est de déterminer le prix des résidus en tant que combustibles. On retiendra l'analyse de M. Defeche, d'EDF : « Il faut leur conférer un prix négatif équivalant à la charge que devrait supporter la collectivité pour leur élimination si l'usine de traitement productrice d'énergie n'existait pas. » Certes ce prix négatif ne doit pas avoir la même valeur partout, mais d'après M. Defeche, il est seul à « justifier de l'intérêt d'une telle installation ».

On remarquera immédiatement que l'inflation des prix des autres formes d'énergie, comme l'augmentation rapide des coûts des autres types de traitement des déchets, favorisent très sensiblement l'utilisation de ces derniers dans la production d'électricité.

Cela étant admis, l'intérêt économique d'une installation avec récupération dépend également des charges d'investissement, des frais d'exploitation et des recettes. Il est évident que l'aspect quantitatif, en particulier, conduit, à puissance calorifique égale, à des investissements plus élevés que ceux d'une centrale thermique classique. De plus, pour éliminer le maximum de frais de transport des résidus, la taille des installations devrait en général être assez faible car proche d'agglomérations la plupart moyennes. On retrouve la même constatation en ce qui concerne les frais d'entretien par rapport à une usine classique.

Quant aux recettes, elles dépendent essentiellement du prix de l'énergie. Ce n'est pas le problème le plus simple à résoudre.

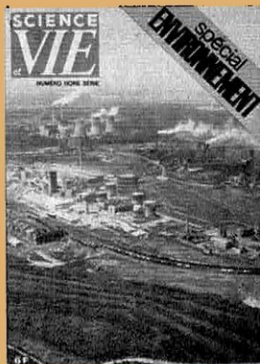
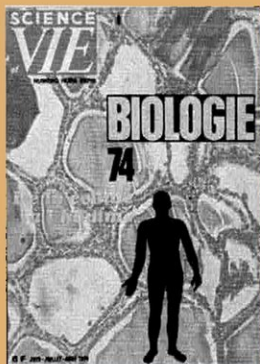
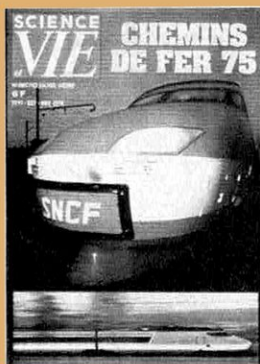
A Milan, des usines d'incinération de déchets urbains fournissent l'énergie électrique aux transports en commun. A Paris, en 1972, trois usines incinéraient 1,55 million de tonnes de résidus, et elles fournissaient au réseau électrique 200 millions de kWh. La même année, l'usine d'incinération d'Ivry faisait 23 F de recette par tonne incinérée. Elle équilibrait son bilan en admettant un coût négatif des résidus voisin de 30 F. Et c'était un an avant la crise de l'énergie.

J.P. BRICOURE

**NUMÉROS
«HORS SÉRIE»
DISPONIBLES**

SCIENCE et VIE

POUR RÉPONDRE A LA DEMANDE DE NOMBREUX LECTEURS, NOUS INDIQUONS CI-DESSOUS LA LISTE DES NUMÉROS HORS-SÉRIE ENCORE DISPONIBLES :



- N° 46 HABITATION (1959)
- N° 52 AUTO 60-61 (1960)
- N° 55 ENERGIE (1961)
- N° 56 AUTO 61-62 (1961)
- N° 57 PHOTO CINE (1961)
- N° 62 WEEK-END (1963)
- N° 64 AUTO 63-64 (1963)
- N° 65 RADIO TELEVISION (1963)
- N° 66 PHOTO CINE (1964)
- N° 68 AUTO 64-65 (1964)
- N° 71 AUTO 65-66 (1965)
- N° 74 HABITATION (1966)
- N° 75 PHOTO CINE (1966)
- N° 76 AUTO 66-67 (1966)
- N° 79 AUTO 67-68 (1967)
- N° 80 PHOTO CINE (1968)
- N° 81 TELEVISION (1968)
- N° 87 AVIATION (1969)
- N° 89 AUTO 69-70 (1969)

- N° 91 NAVIGATION DE PLAISANCE (1971)
- N° 93 AUTO 70-71 (1970)
- N° 95 AVIATION (1971)
- N° 96 AUTO 71-72 (1971)
- N° 97 PHOTO CINE (1972)
- N° 98 MARINE (1972)
- N° 99 NUTRITION ET DIETETIQUE (1972)
- N° 100 AUTO 72-73 (1972)
- N° 101 PHOTO CINE SON (1973)
- N° 102 INFORMATIQUE 73 (1973)
- N° 103 AVIATION 73 (1973)
- N° 104 AUTO 73-74 (1973)
- N° 105 HAUTE FIDELITE (1973)
- N° 106 L'ENVIRONNEMENT (1974)
- N° 107 BIOLOGIE 74 (1974)
- N° 108 CHEMIN DE FER 75 (1974)
- N° 109 PHOTO CINE 75 (1975)

BON DE COMMANDE

à découper ou recopier et à retourner à Science et Vie, 5, rue de la Baume - 75008 Paris.
VEUILLEZ M'ENVOYER LES HORS-SÉRIE :

N°

JE JOINS 8,80 F (franco) par EXEMPLAIRE

RÈGLEMENT A L'ORDRE D'EXCELSIOR-PUBLICATIONS

☐ CCP 3 volets (sans indiquer le n° de compte)

☐ C. Bancaire

☐ Mandat Poste

NOM

PRÉNOM

ADRESSE



LES ÉNERGIES DE LA MER

Songer à la mer pour la production d'énergie n'a rien d'absurde. Les 1400 millions de milliards de tonnes d'eau de l'océan mondial recèlent, sous des formes diverses, des quantités d'énergie formidables. Mais, tout comme l'énergie solaire, celle des mers est extrêmement « diluée » et son exploitation pose des problèmes difficiles. Ainsi les usines marémotrices ne peuvent être implantées que dans des sites tout à fait exceptionnels. Et l'énergie thermique ne saurait être extraite que dans les régions tropicales ou équatoriales.



Le phénomène des marées intriguait déjà les Anciens. Aristote, vers 350 avant J.-C., attribuait les marées à la Lune.

Un navigateur grec de Marseille, Pythéas, qui parcourut l'Atlantique jusqu'aux Îles britanniques, indiqua, vers 425 avant J.-C., la relation entre l'amplitude de la marée et la phase de la Lune. Au premier siècle avant J.-C., Posidonius de Rhodé établit, pour les marées des côtes d'Espagne, un tableau donnant la concordance de leurs variations diurnes, semi-diurnes ⁽¹⁾ et mensuelles avec les mouvements de la Lune et du Soleil...

Ce qui déconcertait les savants était que les amplitudes des marées sont très variables dans le monde. Pourquoi observe-t-on une marée de 1 m à Venise alors qu'à Tahiti, l'amplitude moyenne est de 40 cm, en Méditerranée de 10 à 20 cm, et dans la Baie du Mont-St-Michel de 12,6 m ?

Une explication satisfaisante du phénomène ne vint que plus tard, après les théories de scientifiques illustres comme Kepler, Galilée, Newton, Laplace, Kelvin et Poincaré. En 1897, l'américain Rollin A. Harris réussit à montrer l'importance des phénomènes de résonance dans la formation des marées et expliqua les particularités aux divers points du globe.

La marée est donc un phénomène périodique d'origine astronomique, dû à l'action combinée de la Lune et du Soleil sur les molécules d'eau des océans. L'amplitude de la marée s'explique par un phénomène de résonance : là où les masses fluides ont un rythme intrinsèque en accord avec le rythme astronomique, le mouvement de la mer est amplifié. Dans les mers fermées, les marées sont très faibles ; elles sont insensibles en Mer Noire, par exemple. Par contre, la marée s'amplifie souvent, près des côtes, de façon considérable et surtout au fond des baies qui constituent de véritables « boîtes de résonance ». On comprend alors pourquoi l'amplitude moyenne de la marée est de 10 à 20 cm en Méditerranée, de 4 m dans le Golfe de Gascogne, de 6,5 m à Brest et de 12,6 m dans l'entonnoir formé par la Baie du Mont-St-Michel.

De la roue à aubes à l'usine marémotrice

L'utilisation de l'énergie marémotrice remonte au XII^e siècle avec les « moulins à marée » des côtes bretonnes. Le principe de leur fonctionnement est simple : une digue fermait une anse pour constituer un bassin ; des vannes ménagées dans la digue permettaient le remplissage du bassin à la marée montante ; à la marée descendante le bassin se vidait, par l'intermédiaire d'une roue à aubes, avec production de force motrice. Les moulins à marée ne produisaient donc de l'énergie qu'au reflux. Ils réalisaient un cycle à « simple effet ».

(1) Selon les régions, on peut observer au cours d'une journée, soit deux pleines et deux basses mers (marée semi-diurne), soit une pleine et une basse mer (marée diurne).

L'étape suivante, beaucoup plus tardive, dans l'utilisation de l'énergie des marées, allait être l'usine marémotrice. Le principe de fonctionnement est le même que celui du moulin, mais la réalisation est beaucoup plus complexe, dans la mesure où l'usine exploite la mer dans les deux sens en période de vive-eaux ⁽²⁾ et exécute un cycle dit à « double effet ». L'électricité est produite aussi bien au vidage qu'au remplissage du bassin. Le groupe de turbines « bulbes », qui remplace la roue à aubes, peut fonctionner dans les deux sens.

L'utilisation de l'énergie des marées suppose la construction d'un bassin fermé pouvant communiquer avec la mer et une dénivellation de grande amplitude entre le bassin et la mer à marée basse. La baie du Mont-St-Michel était seule à réunir toutes les conditions. D'où l'implantation d'une première usine marémotrice barrant l'estuaire de la Rance.

L'usine est installée à l'intérieur d'une digue de 750 m traversant l'estuaire de la Rance. En profondeur, l'ouvrage descend jusqu'à — 13 m. Le bassin constitué en amont permet le stockage de 185 millions de mètres-cube d'eau.

En fait, pour rentabiliser au maximum l'exploitation, on ne se contente pas de laisser jouer la marée. On utilise, comme dans certaines installations en « eau douce », la technique du pompage pour augmenter la dénivellation entre le bassin et la mer. Cela revient à faire tourner les groupes bulbes en pompe, en leur fournissant du courant pris sur le réseau général. Ceci, bien entendu, aux heures creuses. La méthode se révèle d'ailleurs hautement rentable ⁽¹⁾.

Au total, avec une puissance de 240 MW, l'usine de la Rance a fourni en 1973 à la France, 568 millions de kWh, ce qui représente environ 0,3 % de la production totale.

Des projets grandioses ?

Un projet de grande envergure fut étudié il y a une dizaine d'années pour fournir 30 milliards de kWh, soit cinquante fois plus que la Rance. Il s'agissait de construire une digue allant de la côte ouest du Cotentin jusqu'à la côte bretonne en s'appuyant sur les îles Chausey.

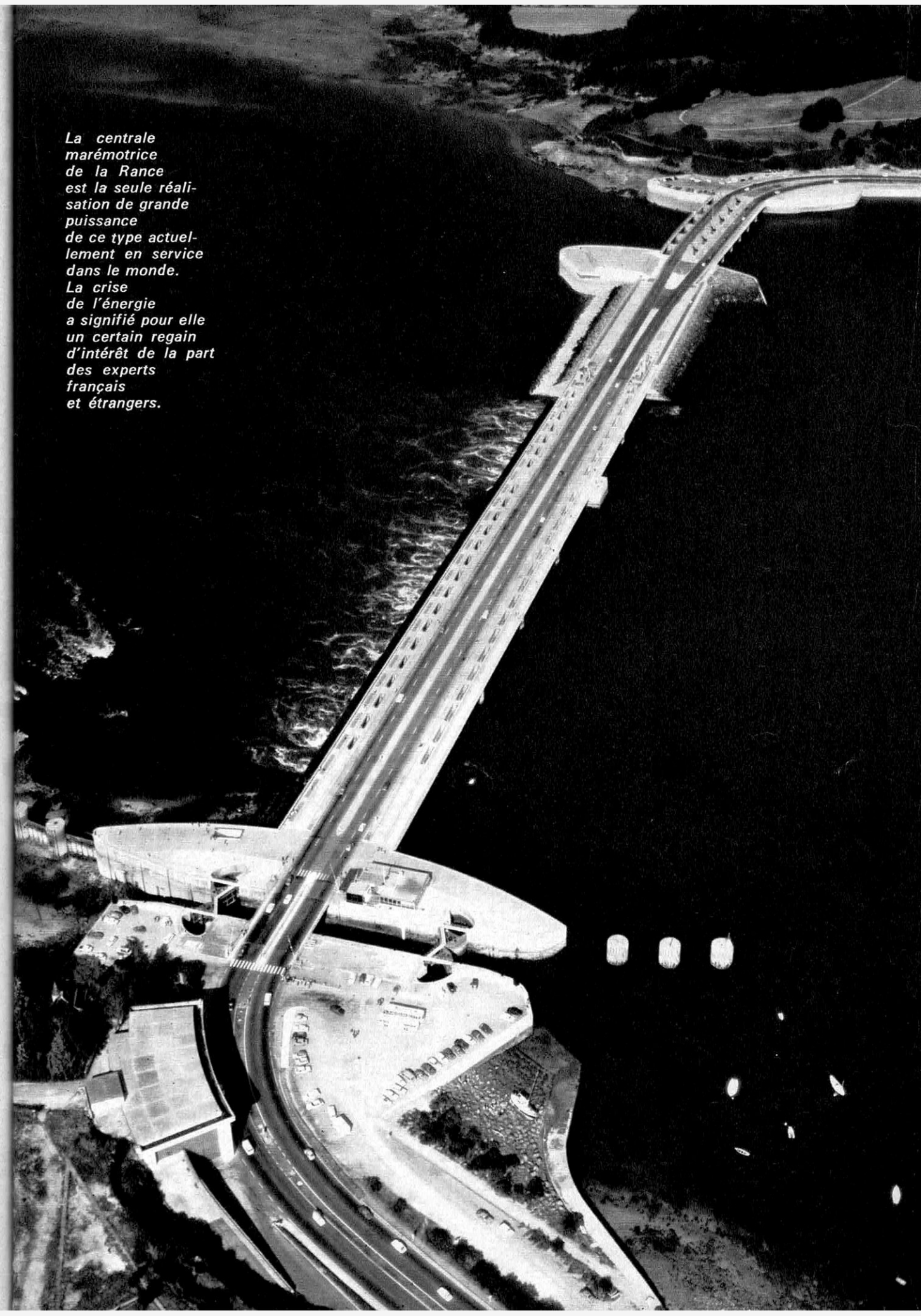
Un projet encore plus ambitieux mettait à profit les Minquiers pour délimiter deux gigantesques bassins et exploiter le plus largement toutes les possibilités de la baie du Mont-St-Michel.

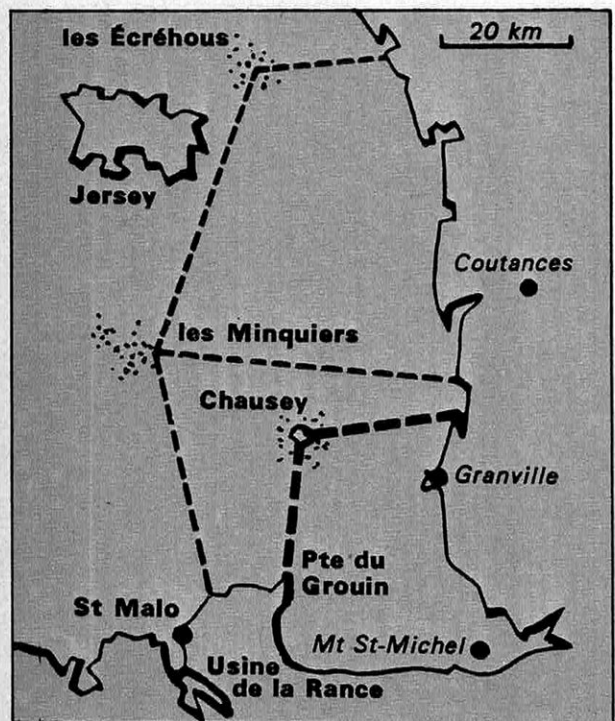
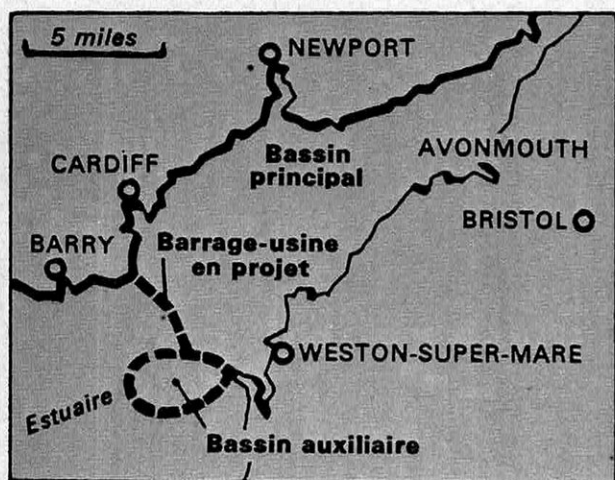
De tels programmes se heurtent en fait à des problèmes techniques considérables. Ils poseraient aussi des problèmes d'environnement (modifications de la faune marine, perturbations de l'hydrologie — puisqu'on supprimerait la marée sur la côte ouest du Cotentin). D'une esthétique discutable, les digues présenteraient aussi un danger certain pour la navigation.

(2) Fortes marées.

(1) Pour chaque kWh prélevé sur le réseau, on obtient, au turbinage, 2,8 kWh.

La centrale
marémotrice
de la Rance
est la seule réali-
sation de grande
puissance
de ce type actuel-
lement en service
dans le monde.
La crise
de l'énergie
a signifié pour elle
un certain regain
d'intérêt de la part
des experts
français
et étrangers.



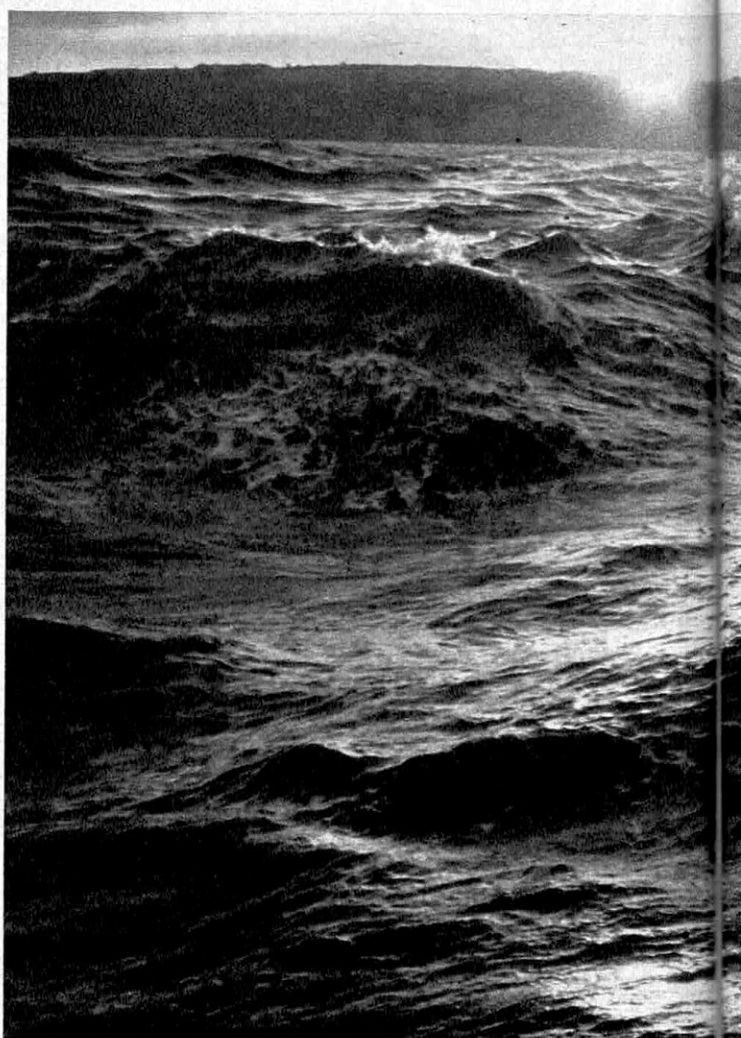


Il existe des projets ambitieux d'utilisation de l'énergie des marées. Par exemple le projet britannique sur l'estuaire de la Severn. Ou les deux possibilités d'installation dans la baie du Mont-Saint-Michel.

A l'étranger existent aussi des projets importants. En particulier le projet canadien de la baie de Fundy, entre la nouvelle Ecosse et le continent, région où les marées sont les plus fortes du monde (jusqu'à 15 m). A noter aussi le projet britannique sur l'embouchure de la Severn, que la crise du pétrole a récemment fait ressortir des cartons. Un système de pompage, animé en heures creuses par une centrale nucléaire construite au voisinage, y accroîtrait la production.

Si l'usine de la Rance et une petite installation soviétique (0,4 MW), réalisée près de Mourmansk, semblent aujourd'hui les seules «marémotrices» en service dans le monde, c'est en fait que le contexte économique a changé, et ceci dès avant la crise pétrolière.

A l'époque où fut achevée l'usine de la Rance, en 1967, le prix du kWh marémoteur pouvait



En plus des marées, vagues et courants marins repré s

être comparé au prix du kWh « thermique » ou « hydraulique ». Mais l'énergie marémotrice s'est vite révélée trop chère, comparée au nucléaire.

On peut comparer la Rance et une centrale nucléaire de type Fessenheim. La construction de l'usine marémotrice est estimée aujourd'hui, en francs courants, à 570 millions. Ceci pour une production annuelle de quelque 600 millions de kWh. Si une « tranche » de nucléaire coûte le double à construire, sa production est de six milliards de kWh, soit dix fois plus que la Rance. La centrale nucléaire peut en effet fonctionner 5 000 heures par an, contre 2 000 pour la marémotrice, qui suit le rythme des marées.

On peut faire remarquer que les frais d'exploitation de l'énergie marémotrice sont plus faibles (1,33 centime le kWh produit, contre 4 centimes pour le nucléaire, et 1,70 centime pour l'hydraulique). Mais cet avantage ne compense pas l'importance de l'investissement, surtout dans une conjoncture où l'argent est rare et cher.

Prudence s'impose

On doit toutefois noter l'attitude de la Commission du Marché commun. Estimant que le contexte économique se prête peu à la construction de centrales marémotrices, elle n'en a pas



Jean Marquis.

sentent d'appréciables quantités d'énergie encore inexploitées.

pour autant catégoriquement écarté la possibilité. Depuis l'affaire du pétrole, les responsables mondiaux de la production d'énergie ont compris qu'il fallait diversifier les sources. En faisant du « tout nucléaire », on risque, à long terme, et pour d'autres raisons, de retomber dans un problème analogue à celui du pétrole. L'approvisionnement des centrales en uranium enrichi n'est en effet pas garanti. Et le « tout nucléaire » risque de conduire à d'autres problèmes encore mal estimés. C'est le cas, en particulier, de la production de plutonium des centrales surrégénératrices.

On peut d'ailleurs remarquer que, depuis l'affaire pétrolière, les techniciens de la Rance reçoivent beaucoup de visiteurs étrangers, britanniques, canadiens, australiens et même coréens du Nord et du Sud.

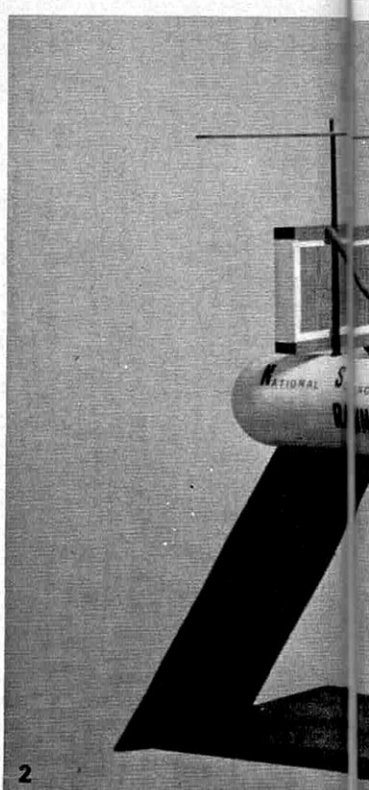
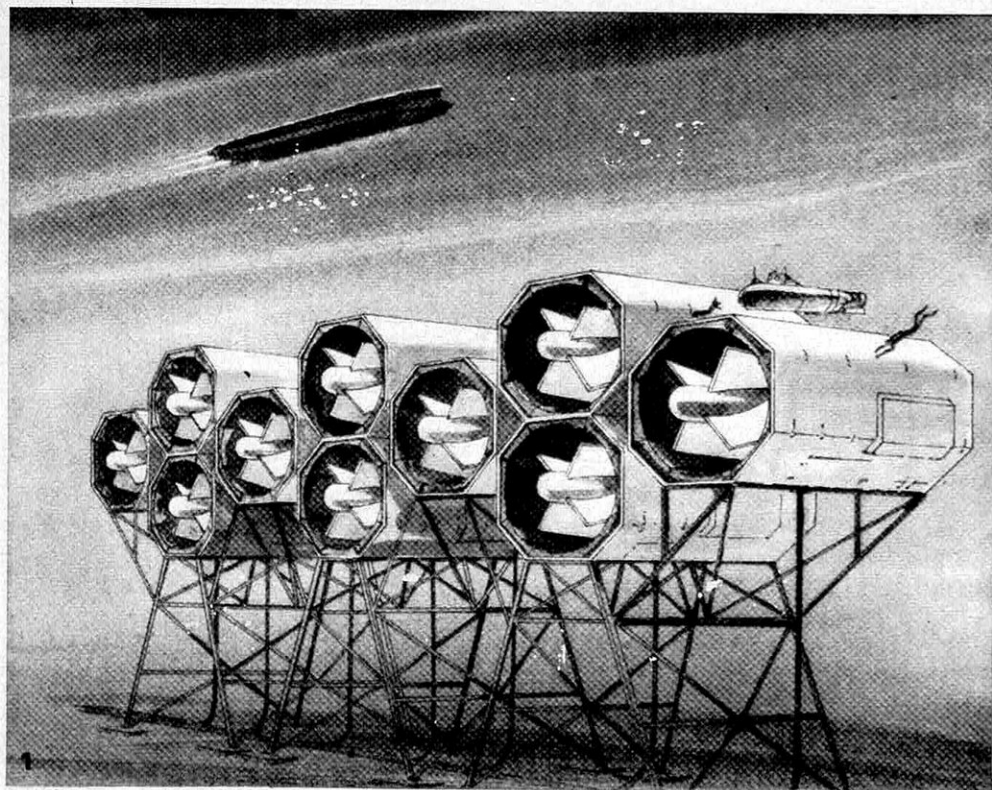
Il est une autre manière d'évoquer le problème de rentabilité concernant l'usine de la Rance. Car celle-ci a permis la mise au point de la technique des groupes bulbes, technique révolutionnaire aujourd'hui utilisée pour les centrales du Rhin et du Rhône, et qui a été largement exportée.

On peut penser que l'économie réalisée sur les centrales françaises équipées de groupes bulbes

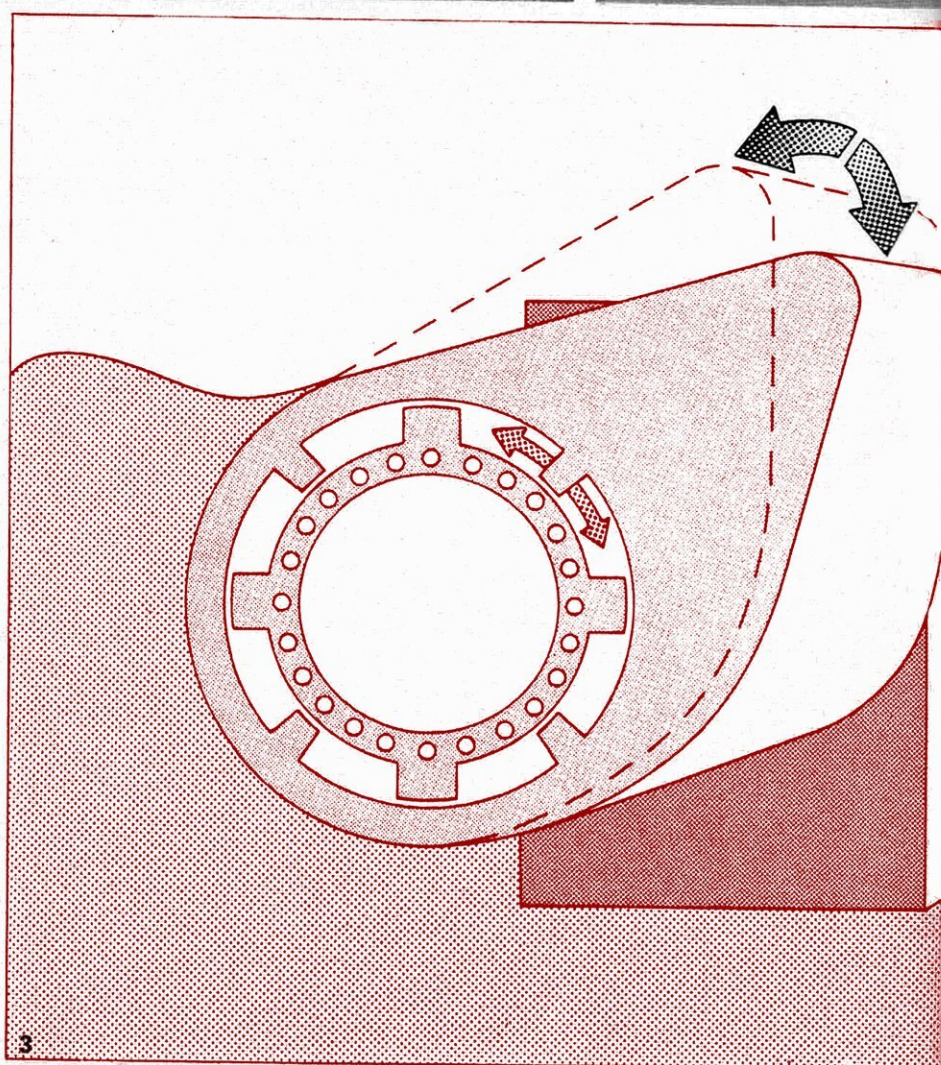
L'ORDINATEUR ET LA RANCE

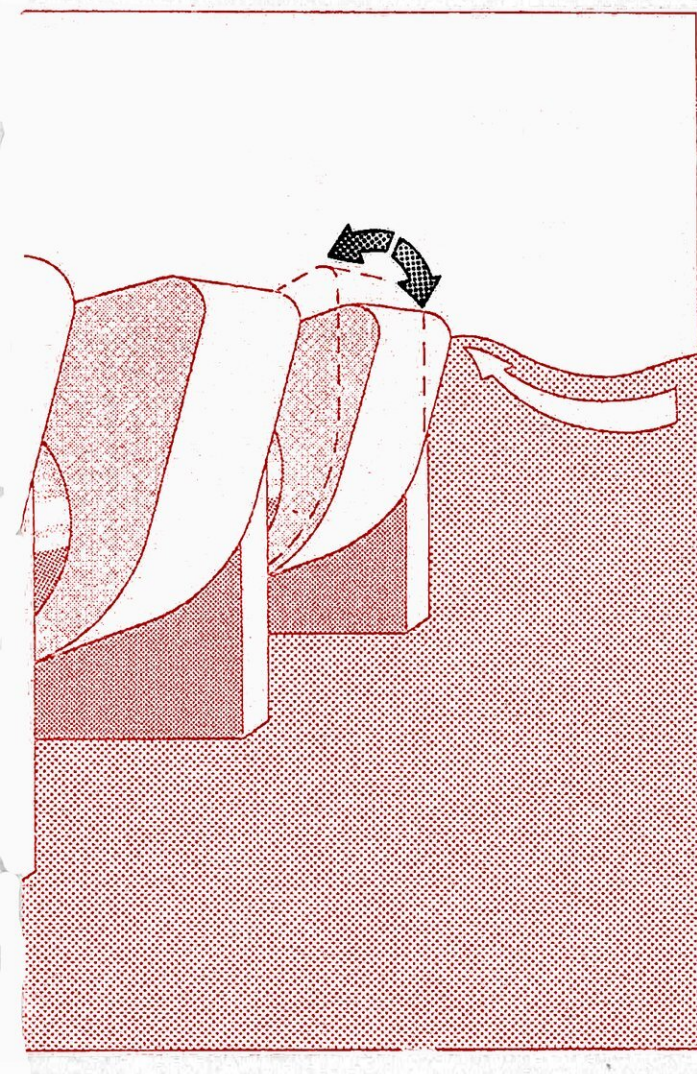
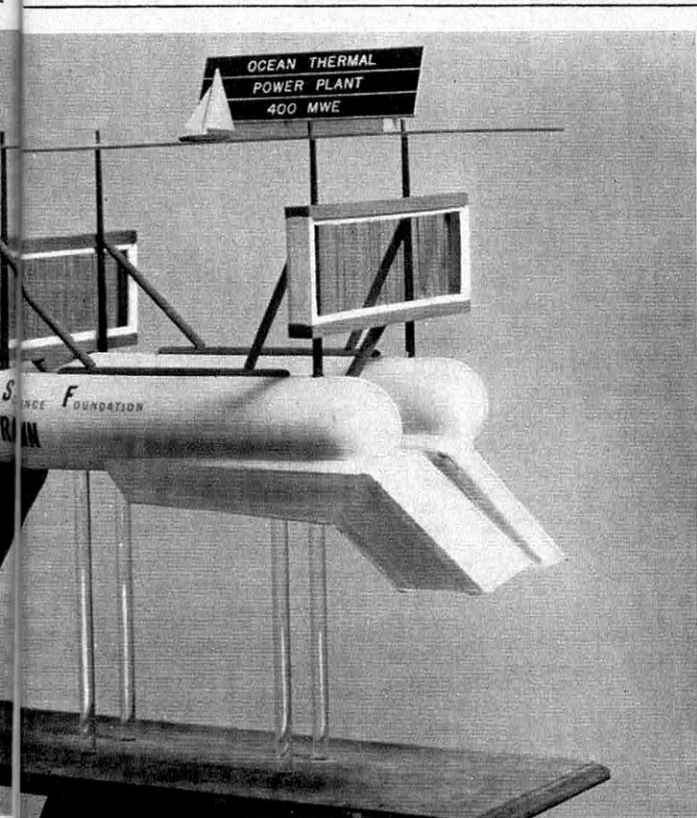
L'ensemble des données, heures et amplitudes des marées, prévisions de consommation, d'électricité disponible sur le réseau, est géré par un ordinateur central installé au dispatching régional de l'EDF à Nantes. L'ordinateur, qui connaît les courbes de charge du réseau français et les courbes des marées, définit le programme. Ce programme est transmis par télex, sur cartes perforées, à l'ordinateur de l'usine de la Rance.

Le rôle de ce dernier est multiple. En fonction du programme qu'il reçoit, il règle les machines toutes les dix minutes (orientation des pales des groupes bulbes, par exemple). D'autre part, comme il existe des écarts, dans le temps ou en amplitude, entre les marées réelles et les marées théoriques (données par l'annuaire des marées), écarts dus au régime des vents ou à la pression atmosphérique, l'ordinateur de la Rance effectue toutes les 10 minutes un micro-rattrapage de ces écarts par rapport au programme. Enfin, la machine vérifie toutes les 30 millisecondes les 1600 relais de sécurité de l'usine marémotrice.



Trois projets d'utilisation de l'énergie des mers. En 1, un système de turbines installées sur le fond et que l'on envisage d'installer au large des côtes américaines pour capter l'énergie du courant de Floride (une branche du Gulf-Stream). En 2, le projet de catamaran submersible étudié par l'université du Massachusetts avec le soutien de la National Science Foundation. Il s'agit d'une version modernisée de la centrale Georges Claude. A la partie supérieure de la maquette, on remarque deux échangeurs de chaleur de grandes dimensions. 3. L'idée de Stephan Salter, professeur à l'Université d'Edimbourg, est d'exploiter, en surface, l'énergie cinétique des vagues. Des pales d'une dizaine de mètres entraîneraient une turbine par l'intermédiaire d'une transmission hydraulique à double effet.





représente sensiblement la moitié des investissements de la Rance.

L'énergie thermique

Une autre forme d'énergie (autre que mécanique) peut être exploitée au sein des mers. Il s'agit de l'énergie thermique. Il y a quelques années, on avait fondé en France beaucoup d'espoir sur un débouché industriel, avec l'application du procédé de Georges Claude. L'idée, explique Claude Riffaud, Directeur du CNEXO, était de réaliser une machine thermique fonctionnant entre deux sources de température, la source chaude étant constituée par de l'eau de mer de surface et la source froide par de l'eau de mer en profondeur. Le fluide qui circulait dans la machine était l'eau de mer elle-même, qu'on pompait en surface, qu'on évaporait sous vide, et qui, après détente dans une turbine, était condensée par contact ou par mélange avec l'eau froide. L'installation pouvait, en outre, fournir de l'eau douce et du sel comme sous-produits.

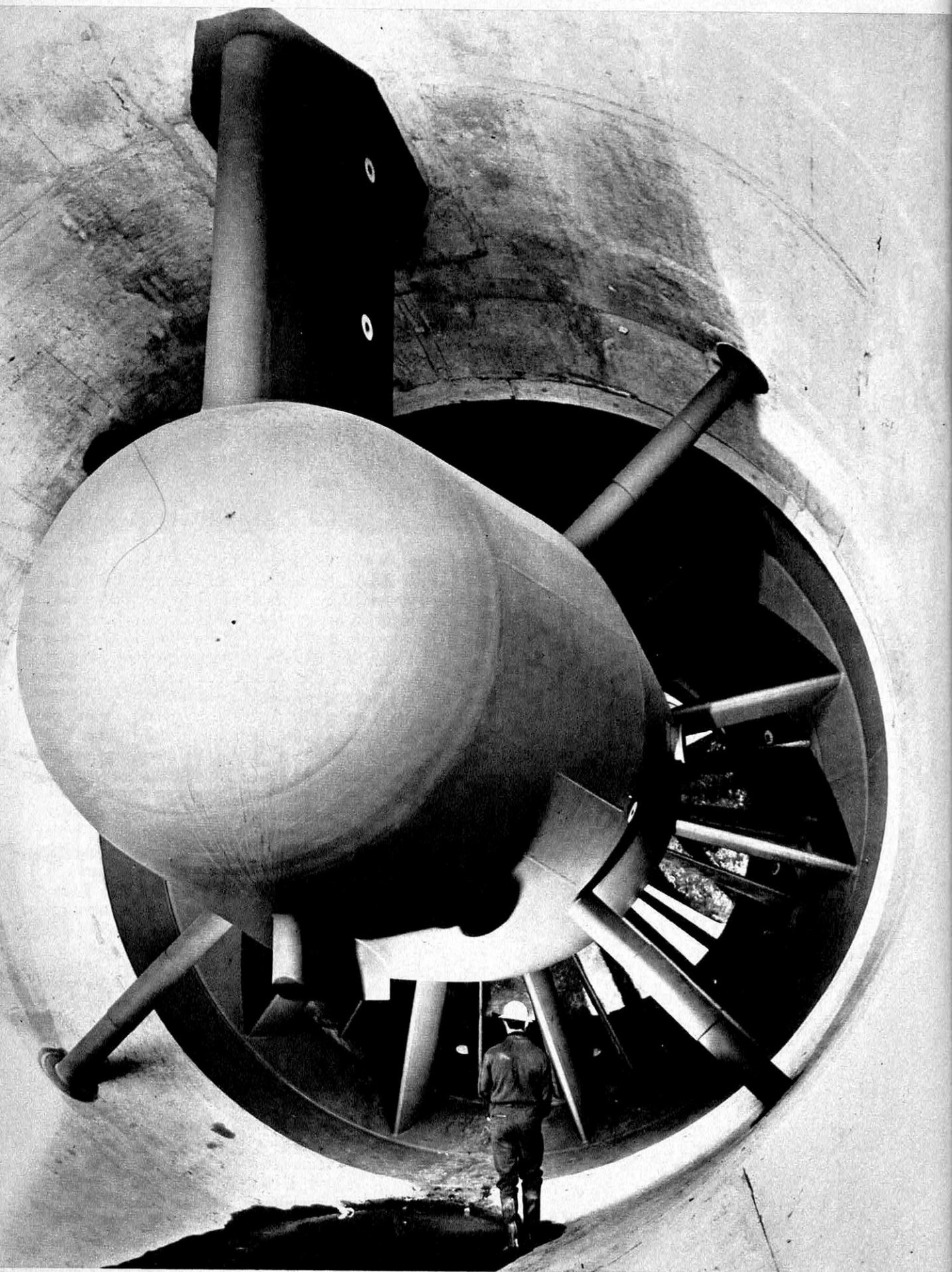
Une machine thermique offre un rendement maximum lorsque l'écart de température entre la source chaude et la source froide est maximum. Il fallait donc installer le système dans une mer équatoriale ou tropicale pour que le gradient de température soit le plus élevé possible. Il fallait aussi de grands fonds à proximité des côtes. Le site « idéal » fut choisi à Abidjan où l'on trouve à 4 km des côtes, une profondeur de 500 m, avec une eau, en profondeur, à 7° et en surface, à 28°. L'objectif était de fournir à la ville une puissance électrique de 10 MW. Il ne fut jamais atteint.

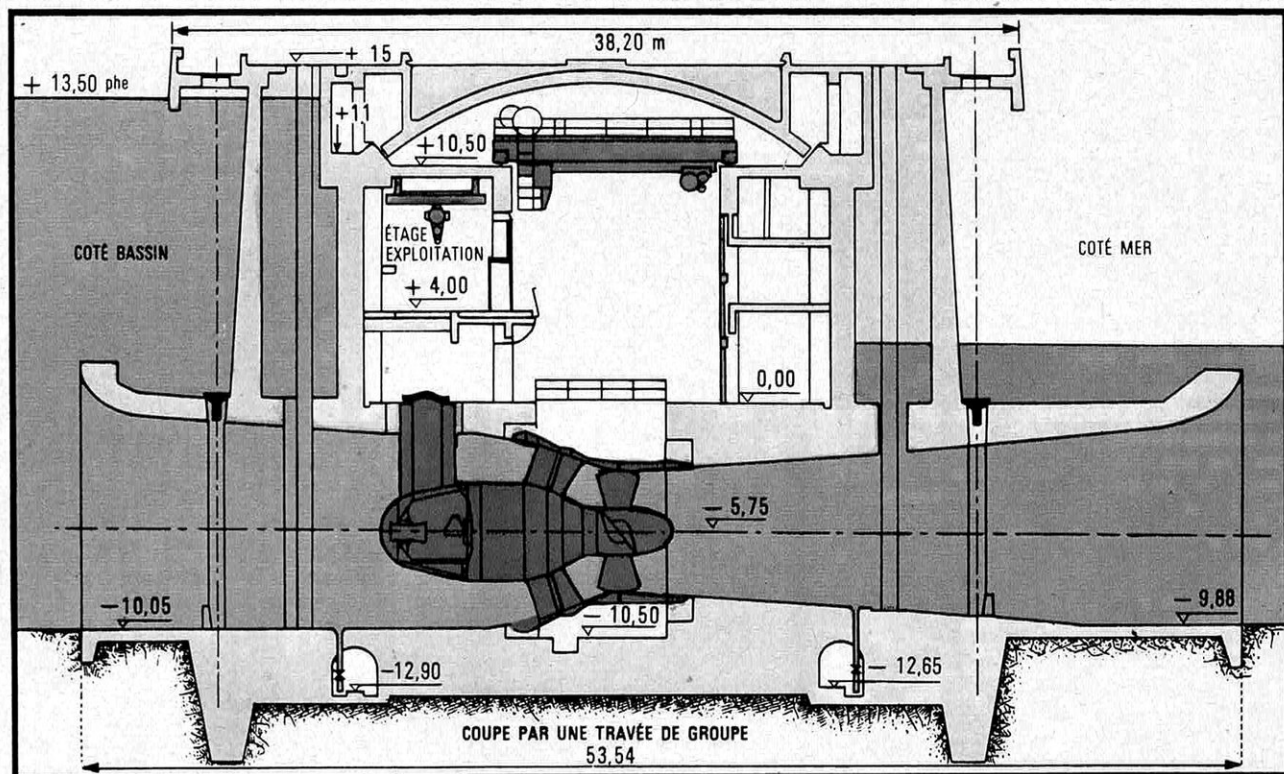
On n'avait pas réussi à surmonter les difficultés techniques de l'installation. Ainsi, les quantités d'eau chaude à évaporer, plus de 30 000 t/h, étaient bien importantes pour une puissance de 10 MW, et les quantités d'eau froide nécessaires pour condenser l'eau, après détente dans la turbine, l'étaient encore plus.

Un autre problème était celui de la prise d'eau froide au fond : on ne réussit jamais à poser la conduite de 4 km par laquelle devait être aspirée l'eau des profondeurs. Et 50 à 80 % du prix de l'usine correspondaient à la réalisation, à l'amenée sur place et à l'immersion de cette conduite. Au niveau de la source chaude, se posaient des problèmes de dégazage de l'eau de mer, de corrosion, d'encrassement. Les turbines, compte tenu de la plage assez restreinte de températures, devaient être très volumineuses.

Pour avoir une idée des coûts, disons que le prix du kWh installé a été évalué à 7 500 F pour la centrale d'Abidjan, contre 2 500 F pour l'usine marémotrice de la Rance.

Israël a essayé d'utiliser l'énergie thermique des mers en prenant comme source froide l'eau de mer de surface et, comme source chaude, de l'eau de mer réchauffée en bassin de faible profondeur : cela permettait un gradient de températures bien meilleur. Malheureusement, il dépendait de l'ensoleillement et les études ont été abandonnées (la méthode serait valable pour un pays équatorial).





Retour sur l'usine de la Rance, avec les groupes bulbes et leur mode d'implantation.

Il est probable que les difficultés d'une installation « thermique » pourraient aujourd'hui être surmontées. On assiste d'ailleurs aux Etats-Unis à un regain d'intérêt pour ce genre de techniques. On propose, en particulier d'utiliser comme fluide de travail des composés très volatils tels que le butane ou l'ammoniac.

Des chercheurs de l'université du Massachusetts ont même proposé une usine « thermomotrice »

immergée dans le Gulf Stream, pour exploiter un gradient de température de 7 à 25° sur une profondeur de 360 m seulement.

Les vagues et les courants

Exploiter la force vive des vagues et des courants est une autre manière de tirer de l'énergie.

En ce qui concerne les vagues, de petites installations existent déjà, en particulier au Japon.

Stephen Salter, professeur à l'Université d'Edimbourg a récemment proposé un système de grands brise-lames flottants munis de vannes mobiles pouvant capter l'énergie de la houle. Selon M. Salter, un tel système pourrait être plus efficace qu'une centrale marémotrice. En tout cas, le gouvernement britannique s'intéresse à ces recherches auxquelles il a attribué des crédits.

On a pu faire des évaluations concernant les possibilités d'exploiter les courants marins, à l'échelle mondiale, pour produire de l'énergie. Des projets existent. Par exemple concernant le courant de Floride, qui n'est autre qu'une branche du Gulf-Stream. On estime que ce courant déplace en un an plus de 50 fois autant d'eau que toutes les rivières du globe. La NOAA (Agence américaine pour l'océan et l'atmosphère) estime qu'on pourra, dans les années 80, y installer des turbines.

Il n'est pas certain encore que toutes les possibilités énergétiques de la mer aient été recensées. Attendons dix, quinze ou vingt ans, et peut-être l'océan mondial fournira-t-il, en plus des matières premières qu'il recèle, une bonne part de l'énergie dont nos sociétés ont tant besoin.

Annie HUMBERT-DROZ

LES GROUPES BULBES

Il existe plusieurs variantes de groupes bulbes, soit pour micro-centrale électrique, soit pour grandes centrales de rivières, soit du type centrale de la Rance.

Dans tous les cas, le groupe comprend une turbine Kaplan à axe horizontal, coïncidant avec l'axe de l'écoulement, avec trois à huit pales courtes. L'alternateur est monté sur le même arbre que la turbine, à l'intérieur d'une enveloppe de révolution formant le bulbe proprement dit. L'ensemble est immergé dans le conduit d'aspiration de l'eau.

L'usine de la Rance rassemble 24 groupes bulbes à turbine quatre-pales à pas variable associée à un alternateur de 10 MW. Ces groupes peuvent fonctionner indifféremment en pompe ou en turbine, par inversion du sens de rotation.

L'unité d'exploitation est constituée par un ensemble de quatre groupes bénéficiant de certains organes communs.

Les unités d'exploitation débitent par deux sur trois transformateurs reliés au poste extérieur 225 kV.

LES PILES A COMBUS- TIBLES

Une pile à combustibles est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. Comment cela? On sait depuis longtemps que sous l'effet d'un courant électrique, les molécules d'eau sont dissociées en hydrogène et en oxygène. C'est l'électrolyse. La pile à combustibles réalise exactement le processus inverse: en recombinant l'oxygène et l'hydrogène pour donner de l'eau, elle produit un courant électrique. Le procédé n'est pas récent, puisque dès 1839, l'Anglais W.R. Grove construisait le premier modèle de laboratoire avec des électrodes en platine.

Jugée sans intérêt, la pile à combustibles fut oubliée pendant près d'un siècle. En 1935, c'est encore un Anglais, F.T. Bacon, qui reprit les travaux. Ils devaient conduire, en 1953, à la mise au point d'un premier prototype de 1 kilowatt. Ce fut le modèle de la pile hydrogène-oxygène des missions spatiales de la série Apollo.

Une retombée spatiale

La grande aventure de l'Espace permit donc le développement rapide de ce procédé, ainsi d'ailleurs que des photopiles solaires. On recherchait alors, à n'importe quel prix, des sources d'énergie autonomes et propres. La Nasa avait, en 1958, encouragé la société américaine Pratt et Whitney, mondialement connue pour ses réacteurs d'avions, à lancer un programme de recherche sur les piles à combustibles. Après les premières réalisations liées aux programmes Apollo et Gemini, on commença à envisager la commercialisation, et en 1967, se créait autour de Pratt et Whitney un groupe de 27 compagnies qui finançait le projet TARGET (Team to Advance Research for Gas Energy Transformation). A l'heure actuelle, 70 de ces piles



A partir des piles qu'elle construit déjà, la firme Pratt et Whitney

sont à l'essai notamment au Canada (Hydro-Québec) où des groupes de six unités débitent des puissances de 75 kW. Quels sont les atouts de la pile à combustibles?

Tout d'abord la simplicité de son principe qui lui donne un énorme avantage théorique sur les centrales thermiques conventionnelles. En effet, dans celles-ci, la transformation de l'énergie s'effectue en trois étapes. L'énergie chimique est d'abord convertie en énergie calorifique, puis celle-ci en énergie mécanique qui, enfin, produit l'énergie électrique. Le rendement s'amoindrit, bien sûr, au fil des étapes. Au total, il ne peut qu'à peine atteindre 40 % et ceci pour les plus grandes centrales.

En revanche, dans les piles à combustibles, l'énergie chimique est transformée directement en énergie électrique. Le rendement atteint facilement 50 % quelle

que soit la dimension de la pile ; il peut être porté à 55 % si l'on utilise de l'hydrogène pur ; et même à 60 % avec de l'hydrogène et de l'oxygène purs, comme c'est le cas dans les capsules spatiales.

Ainsi, une expérience réalisée sur vingt piles à combustibles installées au Canada a montré une économie de 15 à 30 % par rapport à des générateurs diesel de même puissance. Pratt et Whitney assure que, d'ici quelques années, l'économie sera de l'ordre de 30 à 50 %. D'autre part, le fonctionnement de la pile ne demande pas de surveillance particulière et nécessite peu d'entretien.

Hélas, les piles à combustibles coûtent encore trop cher et ont une durée de vie trop courte pour se révéler compétitives avec les centrales thermiques traditionnelles. Elles ne peuvent en effet assurer actuel-



on envisage l'installation de petites centrales électriques modulaires (photo à droite).

lement que 16 000 heures de travail soit à peu près deux ans d'utilisation. En revanche, elles sont parfaitement silencieuses et propres. Le principal déchet n'est que de l'eau pure, si bien que, dans les capsules Apollo, elle a été récupérée pour l'usage des astronautes.

Avec de l'hydrogène

Pour l'instant, les seules piles au point sont celles qui utilisent l'hydrogène comme combustible (soit pur, soit extrait d'un gaz tel que le gaz naturel) et l'oxygène ou l'air comme comburant. Mais de nombreuses autres associations restent à l'étude : méthanol-oxygène, hydrazine-air, ammoniac, hydrures métalliques ou oxyde de carbone-eau oxygénée.

Il semble toutefois que l'avenir des piles à combustibles réside bien dans le couple hydrogène-

air. D'une part parce que ces deux produits se trouvent en quantité considérable sur notre planète ; d'autre part, on peut penser que les deux principales sources d'énergie seront, à plus ou moins longue échéance, l'énergie solaire et la fusion nucléaire. Dans l'un ou l'autre cas, se poseront les problèmes de stockage et de transport de l'énergie entre le site de production et les centres de consommation. Or l'énergie électrique se prête mal au transport qui entraîne des pertes importantes. Elle peut encore moins se stocker. En revanche, l'hydrogène peut se stocker et se transporter à la manière du gaz naturel. La solution semble donc être de tirer l'hydrogène de l'eau de mer, en particulier sur les lieux même de production d'énergie, et de le distribuer ensuite aux consommateurs.

La pile à combustibles, silen-

cieuse, non polluante et à haut rendement, serait alors le moyen idéal d'assurer la production d'électricité partout et pour tous usages. Une des applications les plus intéressantes serait, bien sûr, l'équipement des voitures. Déjà, aux USA, des recherches sont menées dans ce domaine par General Motors et Union Carbide.

Si les conquêtes de la pile à combustibles risquent de demeurer bien timides dans les prochaines années, il n'en reste pas moins qu'elle représente une des solutions les plus séduisantes dans le domaine de l'énergie et qu'elle finira bien par s'imposer sur une grande échelle.

Les Français ne tiennent d'ailleurs pas à se laisser distancer et différents projets sont à l'étude, à l'Institut français du pétrole, au Gaz de France et dans le groupe C.G.E.

A. L.

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

Nouvelle adresse :

43, rue de Dunkerque, 75010 PARIS
Tél. 878.09.95 - C.C.P. 4192-26 PARIS

LES MEILLEURS LIVRES DE L'ANNÉE 1974

LES PLANTES VÉNÉNEUSES. Jean Blain, Grisvard M. — Chaque année de nombreux animaux meurent pour avoir absorbé des plantes dont certaines sont apparemment anodines. L'homme lui-même n'échappe pas à ce genre d'intoxication, qu'il s'agisse d'enfants friands de baies sauvages aussi attirantes que dangereuses ou d'adultes qui ont confondu une plante vénéreuse avec une espèce condimentaire ou médicinale. De plus, les plantes vénéreuses ne se rencontrent pas uniquement parmi les espèces sauvages, beaucoup de plantes cultivées sont parfois dangereuses dans certaines conditions. Étude générale des poisons végétaux. Monographies des plantes vénéreuses. Bibliographie. Glossaire. Index des noms de plantes. 144 p. 21 x 27, 51 planches, relié. 1974 F 36,00

L'ESCARGOT ET LA GRENOUILLE COMESTIBLES. Thévenot et Lesourd. — L'escargot : Zoologie de l'escargot. Espèces d'escargots comestibles. Multiplication et mœurs de l'escargot. Ramassage des escargots. Parcage du Gros Blanc. Élevage de l'escargot. Commercialisation des escargots. Conserves d'escargots. L'escargot dans l'alimentation : recettes culinaires. Avenir de l'escargot en France. La grenouille : Étude zoologique de la grenouille. Multiplication et mœurs de la grenouille. Pêche des grenouilles. Élevage des grenouilles. Commerce des grenouilles. La grenouille dans l'alimentation. 96 p. 14 x 19, 14 fig. 1974 F 15,00

Rappel dans la même collection :

— SALMONICULTURE PRATIQUE F 9,00
— DIX PETITS ÉLEVAGES, lequel choisir ! F 15,00

MANUEL DE L'ÉLECTRICIEN D'AUTOMOBILE. Compain G. et Meyerfeld J. — Le circuit électrique. La résistance électrique. Groupements de générateurs. Les accumulateurs. Magnétisme et électromagnétisme. Electro-aimants. Machines d'induction. Électromoteurs. Allumage. Schémas d'installations électriques. Courants alternatifs et alternateurs. Les redresseurs. Les régulateurs. Les applications électroniques. Lumière et vision. Éclairage. 332 p. 13,5 x 21, 407 fig. 1974 .. F 36,00

ENTREtenir et RÉPARER SON AUTO EN 10 LEÇONS, et tout pour la mise au point de A à Z. Gosselin J.P. — La Belle « occasion ». Les vraies économies. Les travaux d'entretien indispensables. La carrosserie. Le circuit électrique. La carburation. La petite mécanique. Remèdes pour les pannes. La tenue de route. Rouler loin... sans problèmes. 224 p. 14 x 20. Très nbr. ill. et photos. 1974 F 24,00

Rappel dans la même collection, du même auteur :

BIEN CONDUIRE EN 10 LEÇONS. 1973 F 24,00

LES PLAFONDS (Conception et exécution). Bayon R. — L'étude des plafonds. Les plafonds acoustiques. La résistance au feu. Les fonctions annexes du plafond. Les plafonds non-acoustiques. Les plafonds industriels. Les liaisons. Les fiches descriptives. Généralités. Prescriptions techniques. Description des ouvrages. Les plafonds en plaques. Les plafonds métalliques. Plafond pour isolation thermique. Plafond industriel. Plafonds coupe-feu. Plafond plâtre. Plafond éclairant. Plafond en bois. Accessoires. Qualification des entreprises. 176 p. 15,5 x 24, 33 fig., 6 tableaux. 1974 F 52,00

Rappel dans la même collection :

LE PLATRE TRADITIONNEL ET MODERNE. Coste J. F 38,00

CHAUFFAGE ET CONDITIONNEMENT ÉLECTRIQUE DES LOCAUX. Wolf. — Thermique du bâtiment. Chaleur et confort. Paramètres climatiques. Isolation thermique. Inertie thermique des bâtiments. Ventilation. Principaux modes de chauffage. Climatization. Chauffage direct. Chauffage à accumulation. Planchers chauffants. Climatization. Les systèmes de climatization. Principaux modes de régulation. Régulation des systèmes de chauffage direct. Régulation des systèmes de chauffage à accumulation. Régulation des systèmes de climatization. Perspectives et projets. Aspects économiques et perspectives. Exemples de calcul. Annexes. Bibliographie. 558 p. 16,5 x 24,5. Très nbr. fig. et sch. 1974 F 120,00

TRAITÉ DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION. Rietschel H., Raiss W. — (Traduit de la 15^e édition allemande par Sockeel). Tome 2 : Procédés de calcul et exemples. Transfert de la chaleur. Le calcul des installations de chauffage et les bases de la technique calorifique. Problèmes d'écoulement. Calcul des réseaux de tuyauteries. Exploitation des installations de chauffage. Calcul des réseaux de gaines et des bouches de diffusion. Calculs des installations de climatization. Régulation des installations de climatization. Abaques et tableaux numériques. 751 p. 16 x 25. Tableaux et abaques sous pochette. 271 fig. 2^e édition 1974 F 305,00

Rappel :

Tome 1 : Conditions climatiques intérieures et extérieures. Principes fondamentaux de physiologie thermique et d'hygiène. Bases météorologiques et climatiques. Systèmes, éléments, réalisation. Chauffage individuel. Chauffage central. Poste central de production d'eau chaude sanitaire. Chauffage à distance. Technique de la ventilation et de la climatization. 650 p. 16 x 25, 467 fig. Relié. 2^e édition. 1972 F 212,00

SOIXANTE ANS DE TRACTION A VAPEUR SUR LES RÉSEAUX FRANÇAIS (1907-1967). L.M. Vilain. — Cet ouvrage retrace l'évolution des locomotives à vapeur françaises pendant plus d'un demi-siècle, sur l'ensemble des réseaux français, y compris l'ancien réseau d'Alsace-Lorraine et décrivant 330 types de machines. Le matériel locomoteur des grands réseaux en 1907. Ceintures comprises. Apparition du type Pacific en Europe sur le réseau d'Orléans. Évolution de 1908 à 1920, par catégories de machines et dans l'ordre chronologique. Évolution de 1929 à 1937, par catégories de machines et dans l'ordre chronologique. Évolution de 1921 à 1928, par catégories de machines et dans l'ordre chronologique. De 1938 à 1967. — La S.N.C.F. — Mutations de machines de région à région. Améliorations du matériel. — Types nouveaux. Locomotives allemandes et américaines. — Projets d'avenir et machines du Brésil. 320 p. 21 x 27, 440 gravures, 16 tableaux. 1974..... F 172,00

CHIMIE MODERNE. Nikolaïev L. — (Traduit du russe). Atomes et molécules. Fondements physiques de la chimie. L'atome. La molécule. Les lois générales régissant les collectivités de particules. Fondements de la thermodynamique. Les phénomènes chimiques. Les principes de la cinétique chimique. La catalyse. Éléments de photochimie et de radiochimie. Chimie minérale. La loi de la périodicité. Les composés chimiques et les états de valence des atomes. L'hydrogène, l'eau, les solutions et l'eau oxygénée. Les propriétés des corps simples classés par groupes du système périodique. Les hydrures, carbures, siliciures et nitrures. Les composés oxygénés. Les halogénures. Les complexes. Chimie organique. Chimie et géométrie des composés organiques. Types de réactions de la chimie organique. Le comportement des électrons dans les molécules des composés organiques. Chimie du cosmos. Index. 552 p. 14,5 x 22, 87 fig. 1974 F 25,00

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE. Ougarov V. (traduit du russe). — Introduction. Le continuum d'espace-temps d'Einstein et de Minkowski. Transformation de Lorentz. Conséquences de la transformation de Lorentz. Cinématique et dynamique en relativité restreinte (mécanique relativiste du point matériel). Électrodynamique relativiste : potentiels du champ dans le milieu en mouvement. Formules de l'électrodynamique écrites en système de Gauss. Thermodynamique classique et relativité restreinte. La lumière et la théorie de la relativité restreinte. Interprétation géométrique de la relativité restreinte. Paradoxes de la relativité restreinte. Conclusion. Formules principales utilisées dans ce livre. Appendice. Bibliographie. Glossaire. Index. 304 p. 14,5 x 22. 1974 . F 24,00

THÉORIE UNITAIRE. Analyse numérique des équations. Charon J.E. — Les axiomes de base. Rappel des équations obtenues. Les particules de matière et les interactions fortes. L'électron et les interactions électrostatiques. Les photons et les états de spin maximum 1. L'interaction gravitationnelle. Les interactions faibles. Le modèle cosmologique. Conclusion. Tableau des valeurs théoriques obtenues. Références. 149 p. 15,5 x 23. 1974 F 45,00

INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES. Rapin. — Tome 1: Éléments de physique appliqués à la théorie des installations frigorifiques. Grandeurs physiques. Les liquides et les gaz. Thermométrie. Calorimétrie. Statique des gaz. Changements d'état physique. Caractéristiques de l'air humide. Thermodynamique. Caractéristiques physiques des fluides frigorigènes. Mécanique des fluides. 224 p., 18,5 x 24,5, 286 fig. 1973. F 60,00

Tome 2: Technologie. Compresseurs mécaniques. Les compresseurs conventionnels. Motocompresseurs hermétiques et hermétiques accessibles. Compresseurs à exécutions spéciales ou à usages particuliers. Les condenseurs. Les évaporateurs. Les appareils annexes du circuit. Tuyauteries. Robinetterie. Principes généraux de l'automatisme. Appareillages automatiques d'alimentation. Appareillages automatiques de régulation et de sécurité. Les isolants. Mise en œuvre des isolants. Les machines frigorifiques à compression thermique. Principes d'obtention des basses et très basses températures. Bilan thermique d'une installation. Conditionnement de l'air. En guise de conclusion: naissance et évolution des utilisations du froid des matériels frigorifiques. 432 p. 18,5 x 24,5, 440 fig. 1974 ... F 86,00

LA CONGÉLATION ET LES SURGELÉS EN 10 LEÇONS, et tout sur la conservation de A à Z. Cosiva G. — Congeler avec efficacité. Choix et entretien d'un bon congélateur. Sacher emballer. Gagner du temps et de l'argent. La congélation produite par produit. La conservation à bonne température. Sacher décongeler. Des recettes faciles... et agréables. Acheter ou faire livrer vos surgelés ou congelés. Les surgelés et la santé. Lexique. 191 p. 14 x 20. Très nbr. fig. et tableaux. 1974 F 27,00

L'ORGANISATION DES DONNÉES D'UN SYSTÈME. (Précis de logique informatique tome 2) **Warner J.D.** — L'entreprise et son système d'informatique. Introduction. Le système d'informatique dans l'entreprise. La logique informatique. Conclusion de la première partie. **Structures et bases de données.** L'ensemble des structures. Les données de bases. **Résultats, mouvements et programmes.** Résultats demandés et programmes. Mouvements et mise à jour. Conception de l'ensemble informatique. **Conclusion.** Lexique. 160 p. 21 x 27. Très nbr. fig. 1974 F 32,00

Rappel :

Tome 1: LES PROCÉDURES DE TRAITEMENT ET LEURS DONNÉES F 32,00

Dans la même collection, du même auteur :

ENTRAÎNEMENT À LA PROGRAMMATION :

Tome 1: Construction des programmes F 66,00

Tome 2: Exploitation des données F 62,00

MANUEL DE CONSTRUCTION DES BATEAUX EN BOIS (de la pirogue au yacht de croisière). Guide pratique à l'usage de l'amateur et du professionnel. **Steward R.M.** — Traduit de l'américain par Boutin Pierre. — L'outillage. Bois et autres matériaux. Cheville. Lignes et tracés d'exécution. Gabarit et pièces majeures. Sur le chantier. Montage de la membrure. Le bordé. La charpente du pont. Les superstructures. 272 p. 16 x 24,5, 108 fig. 5^e édit. 1974 F 42,00

THÉORIE DES PROBABILITÉS. Ventsel H. — (Traduit du Russe). Introduction. Notions fondamentales de la théorie des probabilités. Théorèmes fondamentaux de la théorie des probabilités. Expériences répétées. Variables aléatoires et lois de répartition. Loi normale. Détermination des lois de répartition des variables aléatoires à partir des données expérimentales. Systèmes de variables aléatoires. Loi de répartition normale d'un système de variables aléatoires. Caractéristiques numériques des fonctions de variables aléatoires. Linéarisation des fonctions. Lois de répartition des fonctions des arguments aléatoires. Théorèmes limites de la théorie des probabilités. Traitement des résultats des expériences. Notions de base de la théorie des fonctions aléatoires. Développements canoniques des fonctions aléatoires. Fonctions aléatoires stationnaires. Notions de base de la théorie de l'information. Éléments de la théorie des phénomènes d'attente. 568 p. 15 x 22. 1974 F 27,00

ÉLÉMENTS DE CALCUL NUMÉRIQUE. Demidovitch et Maron. — (Traduit du Russe). Nombres approchés. Généralités sur la théorie des fractions continues. Calcul des valeurs des fonctions. Résolution approchée des équations algébriques et transcendentes. Procédés spéciaux de résolution approchée des équations algébriques. Amélioration de la convergence des séries. Algèbre des matrices. Systèmes d'équations linéaires. Convergence des processus itératifs des systèmes d'équations linéaires. Généralités sur la théorie des espaces vectoriels. Suppléments sur la convergence des processus itératifs des systèmes d'équations linéaires. Calcul des valeurs propres et des vecteurs propres d'une matrice. Résolution approchée des systèmes d'équations non linéaires; Interpolation des fonctions. Dérivation approchée. Intégration approchée des fonctions. Méthode de Monte-Carlo. 680 p. 15 x 22 1974. ... F 25,00

LES REFLEX (24 x 36, 28 x 28, 18 x 24). **Bau N. et Thévenet A.** — Les reflex. Les reflex mono-objectifs. La visée reflex. Les reflex 24 x 36. Les reflex 18 x 24. Les reflex 28 x 28. Comment fonctionne votre reflex. Différents types d'objectifs. Le temps de pose. Les films. Les filtres. **Les sources de lumière artificielle:** Lampes survoltées. Lampes-éclairs. Flash électronique. **Le laboratoire:** Développement, tirage, agrandissement. La pratique du développement des films. L'agrandissement. La photographie dans les pays tropicaux. **La prise de vues:** Le paysage. Le portrait à la lumière artificielle. Le portrait en plein air. La photographie de nuit. **Les techniques spéciales:** La photographie rapprochée. La photo-macrophotographie. La photomicrographie. La photographie en infra-rouge. Les photogrammes; la reproduction des documents. Photographie stéréoscopique. La reproduction des diapositives. Image panoramique. **La Photographie en couleurs:** Lumière et couleur. Différents types de films en couleurs. La prise de vues à la lumière. La prise de vues en lumière artificielle. La projection fixe. Tableaux et renseignements techniques. 408 p. 16 x 22. 415 photos, schémas et tableaux. 8 photos couleur hors texte. Cart. 6^e édit. 1974 F 44,00

LE NOUVEAU CINÉASTE AMATEUR. Monier P. — Le matériel : Quel est le principe du cinéma ? Faites connaissance avec les caméras 8 mm, Super 8 et Single 8, 9,5 mm et 16 mm. L'objectif, caractéristiques et emplois. Films et filtres. Pour que vos films soient bien exposés. Faites connaissance avec les magnétophones. **A la recherche d'un sujet :** Les thèmes. **Et maintenant... on tourne :** La prise de vues. La fantaisie des truquages. La prise de son en extérieur. A la lumière artificielle. Cet utile titrage. Le secret du cinéma : savoir monter. A chaque film sa sonorisation. Pour obtenir d'agréables projections. Faites connaissance avec les projecteurs. Le cinéma documentaire. Renseignements techniques. 360 p. 15,5 x 21, 642 fig., photos, tableaux et schémas. 20 photos hors-textes couleurs. Relié. 11^e édit. 1974 F 38,00

CINÉ TRUCAGES ET EFFETS SPÉCIAUX, 8/8 Super 8/16. **Monier P.** — Effets et procédés à la portée de tous. Supports de caméras et d'accessoires. Le travelling ou la caméra mobile. Volets, fonds enchainés et surimpression. Les multiples ressources de l'optique. Emploi des caches et doubles impressions. Par le jeu des miroirs et des prismes. L'éclairage et ses sortilèges. Intempéries et cataclysmes à la demande. Titrage sur le « terrain ». Une palette dans la caméra. Votre caméra et les travaux de « laboratoire ». 144 p. 16 x 21, 215 ill. 1974 F 28,00

LE DESSIN ANIMÉ D'AMATEUR ET L'ANIMATION. S. de Marchi et Amiot R. — Le dessin animé : Durée, cadence, émulsion. Travaux préliminaires. L'équipe de réalisation. Préparation du film. Machine de prises de vues. Création des dessins. Animation des dessins. Gouachage des cells. La prise de vues. Post-synchronisation. Animation dans les films d'amateur. Multipane et titrage. Quelques principes d'animation. Les personnages, le décor. Quelques effets spéciaux. Maintenant, quel genre choisir ? Le dessin animé musical. — **Le film d'animation :** Utilisation du matériel de prises de vues. Préparation du film d'animation. Différents types de films d'animation : Le tableau noir. La technique du papier découpé. La photographie animée ou l'animation par phases photographiques. Animation de poudres de couleurs. Les marionnettes animées. Le modelage animé. L'animation en continu. Dessin direct sur pellicule et grattage. En manière de conclusion. 160 p. 16 x 21. 275 fig., photos et schémas. 4 planches photos couleurs. 5^e édit. 1974 F 24,00

200 MONTAGES ONDES COURTES. Huré F. et Piat R. — La réception et l'émission d'amateurs à la portée de tous. Émetteurs et récepteurs de trafic. Montages pratiques à transistors O.C. et V.H.F. Convertisseurs. Procédés de manipulation. Modulation. Émission réception V.H.F. Stations portables et mobiles. Antennes. Mesures. Règles du trafic amateur. 494 p. 16 x 24, 450 fig., schémas et tabl. 7^e édit. 1974 F 60,00

V.H.F. A TRANSISTORS, ÉMISSION-RÉCEPTION. Piat R. — Les oscillateurs à transistors. La réception (V.H.F. et U.H.F.) des fréquences élevées : les récepteurs de début, les convertisseurs 144 MHz, les convertisseurs 432 MHz et... au-delà, au-dessus de 1 GHz, récepteur 144 MHz complet. Les modules moyenne fréquence à accord variable. L'émission V.H.F. à transistors. Le pilotage des émetteurs V.H.F. par oscillateur à fréquence variable (V.F.O.). Alimentation à basse tension. Quelques appareils de mesures à transistors pour la mise au point d'un émetteur ou d'un récepteur. 390 p. 15 x 21, 347 fig., schémas et photos. 4^e édition. 1974 F 45,00

AMPLIFICATEURS HI-FI A TRANSISTORS. Brault R., Brault J.P. — Rappel de quelques notions d'électricité. Amplification. Bref rappel du fonctionnement d'un transistor bipolaire. Réaction négative ou contre-réaction. Transistor à effet de champ à jonction. Amplification de puissance. Étude de quelques amplificateurs complets. L'alimentation des amplificateurs. Le pré-amplificateur. Assemblage des éléments d'une chaîne d'amplification. Mesures à faire sur les amplificateurs. 324 p. 15 x 24, 231 fig. et schémas. 1974 F 37,00

MONTAGES SIMPLES A TRANSISTORS. Huré F. — Les éléments constitutifs d'un récepteur radio à transistors. Le montage. Un récepteur à cristal simple. Les collecteurs d'ondes. Antennes et cadres. Récepteurs simples à montage progressif. Les récepteurs Reflex. Récepteurs superhétérodyne. Amplificateur basse fréquence et divers. Appendice. 176 p. 16 x 24, 150 schémas. 7^e éd. 1974 F 30,00

LES THYRISTORS ET LES TRIACS. Renucci R. — Construction et fonctionnement du thyristor. Caractéristiques du thyristor. Procédés d'amorçage et de blocage des thyristors. Le triac. Commutation statique et commande de phase. Mise en œuvre des thyristors et des triacs. Applications des thyristors et des triacs. 125 p. 15 x 21. 125 fig. schémas et photos. 2^e édition. 1974 F 20,00

ORGUES ÉLECTRONIQUES à transistors et circuits intégrés. Besson R. — Rappels d'acoustique. La musique. Les instruments de musique. La conception des instruments de musique électronique. Les oscillateurs ou générateurs. Les diviseurs de fréquence. Les circuits de distribution. Les circuits de traitement des signaux. L'amplification basse fréquence et l'alimentation. Les enceintes acoustiques. Quelques montages simples ou de complément. 210 p. 15,5 x 24, 164 fig. 1974 F 30,00

CONSTRUCTION DES APPAREILS ÉLECTRONIQUES DU DÉBUTANT. Blaise G. — Outils et composants. Résistances et bobines. Diodes et redresseurs. Détecteurs et radio-récepteurs à diode. Les transistors dans les montages électroniques. Comment réaliser soi-même les circuits imprimés. Conseils pour le montage des composants. Montage sur platines à trous et lignes métallisées. Transistors à effet de champ. Emploi des circuits intégrés. 176 p. 15 x 21, 151 fig. et sch. 1974 F 30,00

TECHNIQUE DU MAGNÉTOPHONE, Bobines, cassettes, cartouches. Masscho R. — Étude préalable. Théorie : Enregistrement. Courant BF et courant US. Reproduction. Effacement. Ruban, bobines, cassettes. Têtes. Microphones. Amplificateurs. Précautions dans la réalisation des amplificateurs. Circuits US. Indicateurs de modulation. Alimentation. Mécanisme. Schémas d'ensemble. Perfectionnements. Magnétophones à cassettes ou à cartouches. Les réducteurs de bruits DNL - DNF - DOLBY - ANRS. Appareils spéciaux. Dispositifs annexes. Maintenance. Mesures. Dépannages. Mesures des performances. Mesures en position enregistrement. Mesures en position reproduction. Mesures globales. Mesures mécaniques. Dépannage. 328 p. 16 x 24. très nbr. fig. 1974 F 54,00

LA MÉCANIQUE DES MAGNÉTOPHONES ACTUELS. P. Hémardinier. — Les nouveaux problèmes mécaniques des magnétophones : défauts, perfectionnements, et pratique des moteurs. La régulation et la variation de vitesse. La régulation des moteurs. Pratique et progrès. Les systèmes d'entraînement des magnétophones. Défauts. Progrès. Pratique. Contrôle et automatisme sur les magnétophones. Progrès et pratique. Précis des cassettes et des cartouches. Pratique, emploi. Maintenance des cassettes et des magnétophones à cassettes. Transformations et pratique des têtes magnétiques. 167 p. 15 x 21, 121 fig. 1974 F 30,00

JE DRESSE MON CHIEN A LA DÉFENSE. Gesell M. — Le choix d'un chiot. Influences de la domestication. Pédagogie canine. Comportement du maître. Pour situer son chien. Éléments de psychologie canine. Apprenons à parler « chien ». Règles essentielles. De l'éthologie. Les exercices d'obéissance. Le saut. Les positions (assis, couché, pas bouger). Le refus d'ap-pât. Du port de la muselière. De l'activité physique. Formation à la défense. Le club de dressage. De l'utilité d'un vrai chien de défense. De l'initiation au pistage. La brigade des chiens de police. Épreuves de dressage. Liste des races de chiens d'utilité. Fiches de concours. Liste des clubs Société Centrale Canine. Bibliographie. 160 p. 16 x 24, 32 photos et tabl. 1974 F 23,70

POISSONS D'AQUARIUM (coll. couleurs de la nature). Erich Braum. — L'aquarium et les poissons. Principes de base. Les noms scientifiques des poissons. Acclimatation. Installation et plantation de l'aquarium. Nourriture. Photographies. Description des poissons. Tableau et position systématique des genres représentés. Index. Bibliographie. 232 p. 13 x 19, 135 photos en couleurs. 1974 F 30,50

Rappel dans la même collection :

LES CHAMPIGNONS
OISEAUX D'EUROPE
PAPILLONS DIURNES
PAPILLONS NOCTURNES
COLÉOPTÈRES.
PIERRES NOBLES

Prix de chaque volume F 30,50

JUDO SPORTIF. Masnières J.L. — Généralités sur les projections. Principes fondamentaux. Situation en début de combat. Attaques à la volée. La garde. Les techniques de base. L'enchaînement au sol. Les contreprises. Techniques par groupes d'attaques. La préparation physique. Appendices. Progression des grades et de l'enseignement, formules de compétition, où pratiquer le judo en France. Vocabulaire d'arbitrage. Lexique. 216 p. 16 x 24. 165 photos, 54 fig., 18 planches hors textes. 1974... F 33,00

Rappel dans la même collection :

BOXE. Petit F 20,90
KARATE DO. Habersetzer F 38,10
SPORTS DE COMBAT (boxe, judo, lutte) F 20,90

PATINAGE ET DANSE SUR GLACE. Delore M. — Les précurseurs. La glace. Glace naturelle. Glace artificielle. Patinoires démontables. Dimension des patinoires. L'équipement. Les patins. Assemblage des patins et des chaussures. Entretien et protection des patins et chaussures. Habillement. Conseils aux débutants. Premières glissades. Les arrêts. Les croisés. Les chutes. Le patinage artistique. Figures imposées. Position du corps. Les cercles. Les figures composées. Les tests. Patinage libre. Les sauts. Les pirouettes. Les pas et attitudes. Le programme court. Les tests de patinage libre. Les exhibitions. Patinage par couple. La cotation. Les notes. Les juges. Les compétitions. La danse sur glace. Les danses imposées. Schémas de danses imposées. Danse de création. Danse libre. Préparation physique, morale et artistique. L'organisation du patinage. Les patinoires en France. Sport spectacle. Patinage et danse classique. Professionnalisme. Patinage et télévision. Lexique du patineur. 200 p. 16 x 24, 48 ph., 90 croquis. 1974 F 33,00

LA PRÉPARATION DU FOOTBALLEUR. Garel F. — Les qualités des joueurs. Buts de la préparation. Plans d'entraînement. L'école de football. Les séances d'entraînement : Pupilles-poussins. Minimes. Cadets. Juniors. Le perfectionnement. Séances mixtes. Séances spécialisées. Séances spécifiques. Les circuits-training. L'intervall-training. Le power-training. L'entraînement individualisé. Le footing. L'isométrie. Les jeux dérivés. La préparation invisible. 292 p. 16 x 24, 250 fig. Nbr. tableaux. 1974 F 33,00

Rappel dans la même collection :

BASKET-BALL. Barraix F 23,70
FOOTBALL. Garel F 20,90
HAND-BALL. Firan F 30,90
VOLLEY-BALL. Sotir F 13,35

LE TISSAGE A LA MAIN. Ryali P. — Histoire du tissage. Les matières premières textiles. Les instruments. L'ourdissage. Finition de la chaîne et tissage élémentaire. Tissage du second degré. Techniques diverses. Notion graphique et analyse des tissus. Le filage à la main. La teinture végétale. Les tapis. La tapisserie. Comment le tisserand peut-il gagner sa vie. Lexique des termes techniques. Annexe. Les fournisseurs, bibliothèques, musées, stages de tissage, bibliographie. 410 p. 13 x 18. Très nbr. photos et fig. 1974 F 40,00

COMMANDES PAR CORRESPONDANCE (France et Étranger)

Les commandes doivent être adressées à la **LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE**, 43, rue de Dunkerque, 75010 Paris. Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme de chèque bancaire ou de mandat-poste (mandat-carte ou mandat-lettre), soit sous forme de virement ou de versement au Compte Chèque Postal de la Librairie : Paris 4192 - 26. Au montant de la commande doivent être ajoutés les frais d'expédition et d'emballage :

- Commande inférieure à F 100 : taxe fixe F 2,00 + 10 % du montant de la commande.
 - Commande de F 100 à F 150 : taxe fixe F 5,00 + 5 % du montant de la commande.
 - Commande supérieure à F 150 : taxe forfaitaire F 5,00. Recommandation obligatoire : F 2,40.
- Taxe de recommandation : France : F 2,40 ; Étranger : 4,70.

Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.

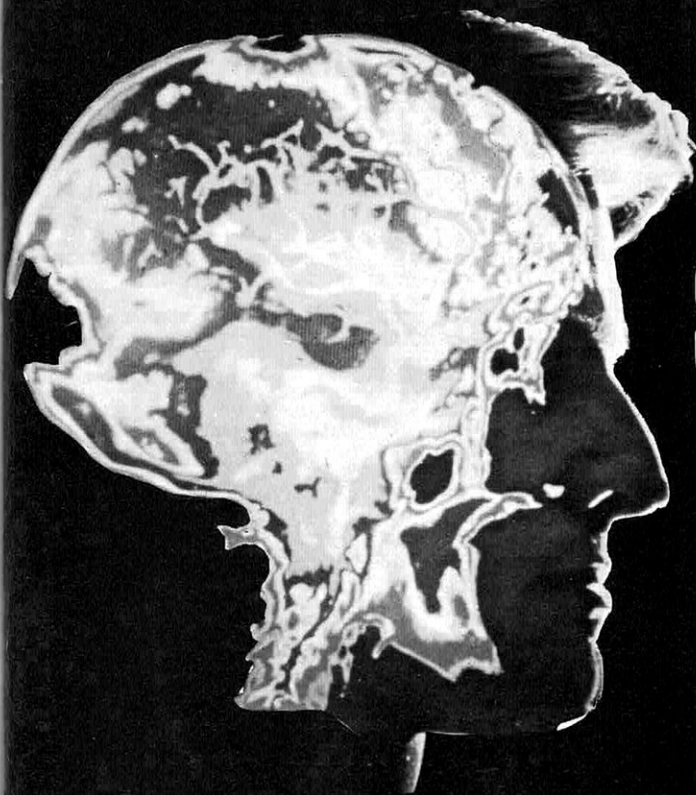
LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 43, rue de Dunkerque, 75010 PARIS

La Librairie est ouverte de 9 h à 19 h (du mardi au samedi) de 10 h à 19 h (le lundi).

Le directeur de la publication : Jacques DUPUY — Dépôt légal : N° 75018 — Imprimerie des Dernières Nouvelles de Strasbourg
Imprimé en France

POUR :

- *ÊTRE LE PREMIER TÉMOIN DES DÉCOUVERTES*
- *SUIVRE LEUR ÉVOLUTION*
- *CONNAÎTRE LEURS APPLICATIONS LES PLUS MODERNES, LES PLUS VITALES :*



*lisez
chaque mois*

SCIENCE&VIE

*2 100 000
lecteurs
à travers
le monde*

SCIENCE&VIE

CE N'EST PAS SEULEMENT LA CONNAISSANCE DES ÉVÉNEMENTS SCIENTIFIQUES, C'EST AUSSI UNE APPROCHE SCIENTIFIQUE POUR EXPLIQUER LES ÉVÉNEMENTS.

