

Edition trimestrielle n° 55 • 3 NF

SCIENCE *et* VIE

NUMÉRO HORS SÉRIE

hydraulique
gaz

atome

pétrole

marées

charbon

vent

soleil

l'énergie

sn repal

chemin du réservoir - Hydra - ALGER VIII^e
105 avenue raymond poincaré - PARIS XVI^e

d'andrea

OFFICE NATIONAL INDUSTRIEL DE L'AZOTE



ONIA

USINES A TOULOUSE
143, route d'Espagne
GA - 94 - 41

AMMONIAC

ACIDE
NITRIQUE

ENGRAIS AZOTÉS

Sulfate d'Ammoniaque
Ammonitrite granule
Ammonitrite perle riche
Nitrate de Chaux

•
"PERLURÉE"
"AZORGAN"

ENGRAIS COMPLEXES

(N. P. K.)

PRODUITS INDUSTRIELS ET GAZ COMPRIMÉS

Urée technique - Méthanol

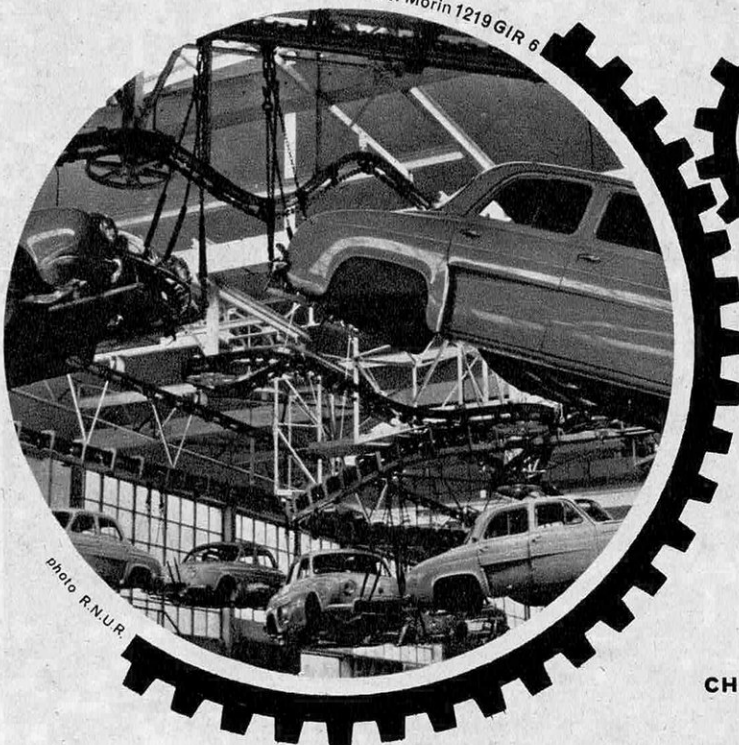
Hydrogène - Azote - Oxygène
Argon - Glace carbonique
Poudres de fer carbonyle
Carbamate d'éthyle (Éthyl-Urethanne)
Azote 15

PROCÉDÉS BREVETÉS

Procédés ONIA et ONIA GEGI pour
le cracking des hydrocarbures liquides
et gazeux : production de gaz
de synthèse, gaz de ville, éthylène, etc.

SIÈGE A PARIS
38, avenue Hoche
WAGRAM 29 - 14

Pub. Morin 1219 GIR 6



à l'origine
de chaque voiture
RENAULT
il y a le
CHARBON

CHARBONNAGES DE FRANCE
9, Avenue Percier - Paris 8^e

VIVE LA COULEUR

mise en relief
par un système optique exceptionnel

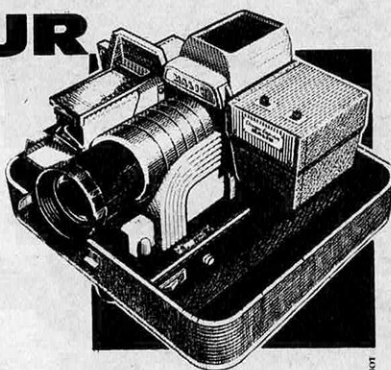
VIVENT

les belles images
auxquelles le refroidisseur **BLOW-AIR-COOLING**
assure une protection totale

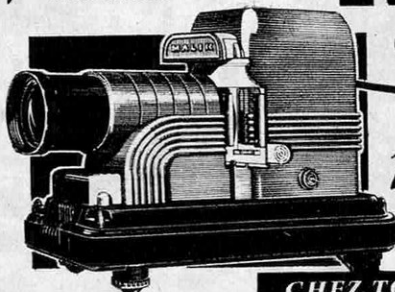
VIVENT

les souvenirs des beaux jours, se succédant sur l'écran,
comme par miracle, animés par les passe-vues
SELETRON SEMIMATIC ou CHANGEUR ELECTRIQUE du

PHOTO-PROJECTEUR



équipe sur demande du
VARIMALIK
Objectif à
FOYER VARIABLE



MALIK

QUALITÉ FRANCE

nouveau! **"STANDARD" 300 W**
198 NF CLASSE **"MALIK"**
+ LAMPE 4 PORTÉE DE TOUS

CHEZ TOUS LES CONCESSIONNAIRES AGRÉÉS

PUBLI CEE PHOTO

LE COBALT

ALLIE DE CHOIX
METAL
DES PERFORMANCES

A l'état métallique, dans les alliages ou sous forme d'oxydes et sels, le Cobalt est employé en quantité croissante dans les domaines industriels les plus variés.

aimants permanents à haut flux
alliages réfractaires
alliages résistants à l'usure
colorants émaillerie sur tôle siccatis
aliments pour bétail et amendement des sols
catalyseurs.

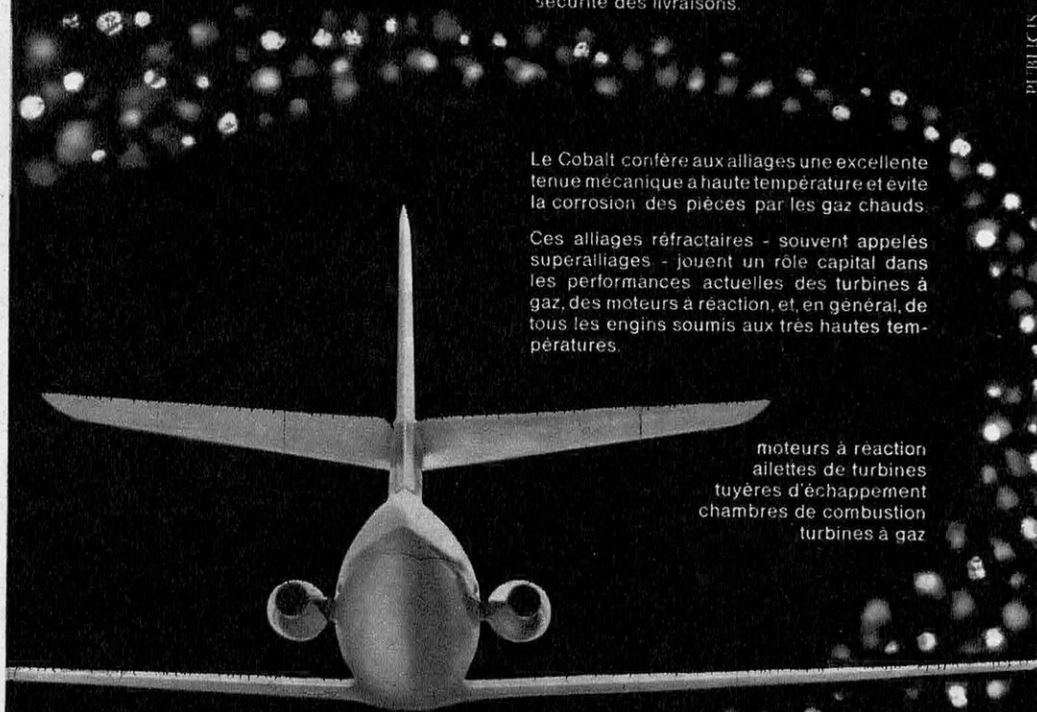
Les difficultés d'approvisionnement qu'on a connues dans un passé récent ont disparu et le Cobalt est désormais disponible abondamment sur le marché.

L'importance des gisements et les techniques poussées d'extraction garantissent la sécurité des livraisons.

Le Cobalt confère aux alliages une excellente tenue mécanique à haute température et évite la corrosion des pièces par les gaz chauds.

Ces alliages réfractaires - souvent appelés superalliages - jouent un rôle capital dans les performances actuelles des turbines à gaz, des moteurs à réaction, et, en général, de tous les engins soumis aux très hautes températures.

moteurs à réaction
ailettes de turbines
tuyères d'échappement
chambres de combustion
turbines à gaz



Le Cobalt du Katanga est vendu en France par

MINERAIS ET METAUX

qui met à la disposition des industriels français son équipe de conseillers techniques.

61 AVENUE HOCHÉ PARIS MAC-MAHON 14-20 17-10 No DE TELEX 20-888



*Le grand mensuel
de vulgarisation scientifique*

PLUS D'UN MILLION DE LECTEURS CHAQUE MOIS

**un numéro acheté est lu
par 4 à 5 personnes**



La seule Revue qui permette de suivre d'une façon claire et précise le développement des sciences, des techniques françaises et internationales, et leurs applications à la vie moderne.



En vente dans 62 pays

EN FRANCE LE NUMÉRO 1,50 NF

L'ÉNERGIE

Cette bibliographie établie d'après le stock d'ouvrages sélectionnés de notre librairie, ne représente qu'une partie des ouvrages figurant dans notre catalogue général.

(Catalogue général, 7^e édition 1960, prix franco NF 4,00)

PÉTROLE - GAZ

GÉOLOGIE DES PÉTROLES. Principes et applications.

Robert M. Les principes : Éléments de chimie organique du pétrole. Les pétroles ; leur composition. La formation des pétroles. Le passage des roches organiques sapropéliennes aux roches bitumeuses. Les gîtes de pétrole et le milieu dans lequel ils se sont formés. Les eaux océaniques et les eaux continentales. Les eaux salées des gîtes pétrolifères, appelées eaux de gisements. La migration des pétroles. Les roches réservoirs ou roches magasins. Possibilité de trouver des gîtes pétrolifères dans des sédiments non marins. La diagenèse des pétroles. Les indices superficiels (Shows) des gîtes pétrolifères. Les aires probables des gîtes pétrolifères. Les sites dans lesquels sont distribués les gîtes pétrolifères. L'évolution des idées au sujet des pétroles. La distribution géologique et géographique du pétrole. Application des principes de la géologie pétrolière à l'étude des gîtes : Les gîtes du Moyen-Orient. La région du nord de l'Afrique. La frange occidentale du continent africain, Madagascar, l'intérieur du continent. Le pétrole en Europe occidentale. — 285 p. 19,5 x 27, 45 fig., 1959 NF 50,00

LE PÉTROLE. Flandrin J. et Chapelle J. Géologie, prospection, exploitation : Géologie du pétrole. Prospection pétrolière. Les forages. Mise en production des gisements. Répartition géographique : Réserves et productions mondiales. Les principaux pays producteurs. Les recherches françaises. L'industrie du pétrole dans le monde : Production et réserves mondiales du pétrole. Stockage et transport du pétrole. Raffinage du pétrole et pétrochimie. Le gaz naturel. Les grands groupes pétroliers. L'industrie française du pétrole. 372 p. 18 x 24, 25 planches Tr. nbr. tabl. Relié toile, 1961 NF 39,00

MANUEL DE POSE DES PIPE-LINES. Lévêque L. La piste. Transport et bardage des tubes. Cintrage des tubes. Assemblage du pipe-line. Soudage des joints. Contrôle des joints soudés. Autres méthodes de soudage. Enrobage de la conduite. Ouverture de la tranchée. Mise en fouille raccords. Traversées et points spéciaux. Remise en état, essais généraux, travaux annexes. Services généraux du chantier. 184 p. 16 x 25, 69 fig., 1 dépliant hors-texte, 1960 NF 23,00

PÉTROLE : PROPRIÉTÉS ET UTILISATIONS.

Tome II : LES GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉS. Cabaret A. Caractéristiques des carburants en relation avec le fonctionnement du moteur (Durier Y.). Les gazoils moteur et les combustibles pour Diesel (Lefebvre de Giovanni J.). Le chauffage par les combustibles liquides (Guillemic A.). Les bitumes de pétrole (Lefol J.). 331 p. 13,5 x 21, 90 fig., 1952 NF 18,00

Tome III : LES LUBRIFIANTS ET LA TECHNIQUE DU GRAISSAGE. Prevost J. Généralités. Propriétés chimiques et physiques des lubrifiants. Préparation et composition des lubrifiants naturels. Lubrifiants artificiels et composés. Mécanique théorique et pratique du graissage. Applications industrielles de la technique du graissage. 320 p. 13,5 x 21, 64 fig., 1959 NF 19,50

Tome IV : LE PÉTROLE, SOURCE DE PRODUITS CHIMIQUES. Moulin M. L'utilisation par l'industrie chimique des matières premières issues du pétrole. 107 p. 13,5 x 21, 10 fig., 1953 NF 9,00

LES DÉRIVÉS DU PÉTROLE. Fourret E. et Blanchier M. Combustibles liquides et lubrifiants. Origine, variétés, classification et raffinage des pétroles. Combustibles dérivés

du pétrole. Techniques physico-chimiques. Lubrifiants. Méthodes d'analyses et résultats analytiques. 270 p. 18 x 24,5 1953, relié NF 16,20

PÉTROLE. TRANSPORT ET DISTRIBUTION. Daric G., Pasqualini J. et différents auteurs :

Tome I : Implantation générale des raffineries et entrepôts. Le matériel de transport et de stockage. La sécurité dans l'industrie du pétrole. La législation douanière et le contrôle douanier. Le jaugeage et le barémage. 296 p. 13,5 x 21, 79 fig., 1952 NF 15,50

PÉTROLE ET GAZ NATUREL DANS LE MONDE.

Vasseur L. V. (Coll. A. C. n° 328). 216 p. 11 x 17,6 fig., 1958 NF 4,50

CHARBON, COKE ET SOUS-PRODUITS. Wilson P. J.

et Wells J. H. Traduit de l'anglais par Bresson H. Nature et importance de la carbonisation du charbon. Combustibles et combustion. Origine, classification et propriétés des charbons. Caractéristiques du charbon pour la carbonisation. Préparation et épurage des charbons à coke. Stockage du charbon. Fours à coke. La cokéfaction dans les fours à coke. Le coke de haute température. Le gaz. Ammoniac et sels ammoniacaux. Benzol. Goudron et houille. Distillation de la houille pour la production de gaz de ville. Divers procédés des distillation à basse température et procédé Curran-Knowles. Position économique des industries de la carbonisation. Tendance dans l'industrie de la carbonisation. 567 p. 15,5 x 23,5, 149 fig., relié toile, 1953 NF 85,00

LES UTILISATIONS DU GAZ NATUREL. Medici M.

Traduit de l'italien par Cantryn P. Caractéristiques physico-chimiques du gaz naturel. Les caractéristiques thermiques de la combustion du gaz naturel. Brûleurs à gaz naturel. Emploi du gaz naturel comme combustible pour la production de vapeur et dans l'industrie sidérurgique. L'emploi du gaz naturel : dans l'industrie du verre, pour la cuisson des ciments, dans l'industrie des briques et tuiles, dans les fours à chaux verticaux. La compression du gaz naturel. Emploi du gaz naturel comme carburant pour véhicules. Les moteurs Diesel mixtes à gaz naturel. Les compresseurs et motocompresseurs pour le gaz naturel. Les turbocompresseurs et les turbosoufflantes pour le gaz naturel. Les utilisations chimiques du gaz naturel. Les utilisations du gaz naturel comme gaz de ville. La sécurité avec le gaz naturel. 242 p. 16 x 25, 153 fig., relié toile, 1959 NF 36,00

COMBUSTIBLES GAZEUX. Interchangeabilité des gaz.

Applications domestiques. Belakhowsky S. Notions générales : Notions de chimie, de physique. Combustion. Historique des combustibles. Combustibles gazeux : Historique et description des combustibles. Combustibles gazeux naturels. Gaz de houille. Gaz de pétrole. Interchangeabilité des gaz. Distribution du gaz. Stockage, transport, comptage et facturation du gaz. Applications domestiques : Distribution du gaz dans les immeubles. Chauffage. Production d'eau chaude. Appareils ménagers. Protection, régulation, estampillage : Protection et régulation automatique. Ventilation. Estampillage. 242 p. 15,5 x 24, 140 fig., 42 tabl., 1961 NF 28,80

FORMULAIRE DES GAZ. Bouron A. Définitions. Lois,

constantes. Les gaz commerciaux. Contrôle et mesure des gaz. Manutention et transport des gaz. Utilisation des gaz. 212 p. 14 x 22,37 fig., 52 tabl., relié, 1957 NF 24,00

ÉLECTRICITÉ

AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES. Ginocchio R. Généralités. Ressources naturelles. Principe des aménagements ; Généralités. Étude des ressources naturelles. Structure d'un aménagement. Les différents types d'aménagement. Les ouvrages de retenue : Généralités sur les barrages. Barrages fixes. Barrages mobiles. Organes annexes des ouvrages de retenue. **Ouvrages de dérivation :** Ouvrages de prise d'eau, d'amenée et de restitution. Conduites forcées. Cheminées d'équilibre. Ouvrages annexes. **Turbines, pompes et usines hydrauliques :** Les turbines hydrauliques. Pompes d'accumulation. Aménagement des usines hydroélectriques. **Annexes ;** Essais sur modèles réduits. Comparaison économique des aménagements hydroélectriques et thermiques. 482 p. 16 x 24, 172 fig., 10 pl. hors-texte, 1959 NF 35,00

HYDRAULIQUE APPLIQUÉE A L'EXPLOITATION DES USINES HYDROÉLECTRIQUES. Salazard J. Hydrostatique. Notions d'hydrodynamique. Aménagements d'eau. Les turbines hydrauliques. Régulation des turbines. Organes de sécurité et de protection. 155 p. 16 x 25, fig., 1957 NF 15,00

USINES DE DÉRIVATION. Varlet H. Tome I : **Captage des eaux. Canalisations à écoulement libre.** Ouvrages de captage des eaux. Ouvrages de prise d'eau. Calcul hydraulique. Calcul hydraulique des barrages. Canaux d'amenée découverts. Canaux d'amenée découverts en régime variable. Canaux d'amenée découverts et canaux d'amenée souterrains (tunnels) à écoulement libre. 344 p. 16 x 25, 207 fig., relié toile, sous jaquette, 1958 NF 46,00
Tome II : **Conduites forcées. Tunnels d'amenée en charge. Usines souterraines.** Chambres de mise en charge. Conduites forcées. Coups de bélier. Tracé d'ensemble du canal d'amenée et conduites forcées. Canalisation d'amenée en charge. Cheminées d'équilibre. Usines souterraines. 276 p. 16 x 25, 136 fig., 4 planches hors-texte, relié toile, sous jaquette, 1958 NF 44,00

LA HOUILLE BLANCHE (Coll. A.C. N° 23). Cavallès M. L'industrie de la houille blanche. Les pays de la houille blanche. 218 p. 11 x 16,5, 8 cartes, 3 fig., 4^e édit., revue et mise à jour, 1946 NF 4,50

LES TRANSPORTS MODERNES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. Laurent R. et Roger D. Étude générale d'un transport d'énergie, d'une distribution d'énergie. Caractéristiques et calculs des canalisations aériennes et souterraines. Établissement d'un réseau aérien, d'un réseau souterrain, des postes de transformation. Perturbations dans les réseaux, dispositifs de protection. Essais des lignes électriques, recherche et mesure des défauts. Mouvements d'énergie. Sécurité. Entretien. Tarification de l'énergie électrique. 822 p. 13,5 x 21,5, 577 fig., 1951... NF 25,00

INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES A HAUTE ET BASSE TENSION. Mauduit A. Production, transport et distribution de l'énergie électrique.

Tome I : Généralités, propriétés des diélectriques gazeux, liquides et solides. Câbles à haute tension. Lignes aériennes. Potentiels, dangers et études de tension dans les lignes. Défauts dans les réseaux. 463 p. 16 x 25, 137 fig., 3^e édit., 1956, relié NF 44,00

Tome II : **Appareillage :** Pièces isolantes ; interrupteurs. Interrupteurs pour courants alternatifs à haute tension. Étude de la loi de variation de la tension de rétablissement. Théorie de la coupure d'un arc à courant alternatif. Réalisation d'interrupteurs à bain d'huile à grand pouvoir de coupure. Interrupteurs à faible volume d'huile. Disjoncteurs pneumatiques. Disjoncteurs divers. **Protection des réseaux contre les défauts :** Relais et dispositifs de protection. Protection sélective. Coupe-circuit à fusibles à basse et haute tension. **Surintensités.** Réduction du gradient de tension d'une onde mobile par l'emploi d'inductances et de condensateurs. Méthode graphique Bergeron pour l'étude de la propagation des ondes le long des lignes électriques. Emploi du calcul opérationnel pour l'étude des ondes mobiles dans les lignes. Surintensités dues aux phénomènes atmosphériques. Surintensités dans les enroulements de transformateurs. Coordination des isolements. 548 p. 16 x 25, 320 fig., relié toile, sous jaquette illustrée, 3^e édit. augmentée et mise à jour, 1959. NF 64,00

Tome III : **Exécution pratique des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique.** Centrales. Groupes générateurs. Postes de transformation haute tension. Postes de couplage. Lignes aériennes : Calcul mécanique des conducteurs de lignes. Support des lignes aériennes avec leur armement. Postes de distribution, postes de transformation pour distribution en basse tension. Accumulateurs. **Exploitation des distributions d'énergie.** Transport d'énergie par des lignes. Stabilité statique des réseaux. Auxiliaires du calcul des réseaux. Stabilité dynamique des réseaux. Répartition ou échange des puissances entre les centrales d'une interconnexion. Régulation de la tension des réseaux de distribution. Qualité du service. Prix de revient et tarification de l'énergie électrique. — 430 p. 16 x 25, 176 fig., relié toile, sous jaquette illustrée, 3^e édition augmentée et mise à jour, 1959 NF 54,00

ÉTUDE ET CONSTRUCTION DES LIGNES ÉLECTRIQUES AÉRIENNES. Lavanchy Ch. Calculs électriques des lignes de transmission d'énergie. Étude mécanique des lignes de transmission d'énergie. Étude économique et principes de construction des lignes de transmission d'énergie. — 638 p. 16,5 x 25,5, 306 fig., 1952 ... NF 38,00

LES PETITES TURBINES HYDROÉLECTRIQUES MODERNES. Lanoy H. Aménagement et électrification des ruisseaux, petites chutes d'eau. — 80 p. 13,5 x 21, 39 fig. et tabl., 1949 NF 6,00

EMPLOI ET CHARGE DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES. Harvey R.A. Traduit de l'anglais par Génin G. et M. Historique. Caractéristiques des différents types d'accumulateurs et de leur fonctionnement. Principes généraux applicables à la charge des batteries d'accumulateurs. La charge au moyen de courant continu. La charge avec courant alternatif et emploi de redresseurs. La charge sur banc des batteries transportables. Applications des batteries d'accumulateurs dans la traction électrique, dans les installations d'éclairage de sécurité, dans les stations centrales et les sous-stations, dans les centraux téléphoniques, dans la marine, dans les chemins de fer, dans les mines. Batteries d'aviation et batteries d'automobiles. Les batteries dans les stations isolées de production de courant. 416 p. 16 x 25, 283 fig., relié toile, 1956 NF 39,00

LES PILES ÉLECTRIQUES. Vinal G.-W. Traduit de l'américain par Génin G. Théorie élémentaire des piles électriques. Piles sèches, matières premières et fabrication. Caractéristiques de fonctionnement. Influence des basses températures. Piles spéciales pour basses températures. Piles étalons. Étalons de force électromotrice. Piles à dépolarisation par l'air et autres dépolarisants. Éléments au cuivre et à l'oxyde de cuivre. Éléments à oxyde du chlorure d'argent. Éléments au plomb à produits de réaction solubles. Piles sèches à l'oxyde mercurique et au vanadium. Éléments à électrolyte fondu. 346 p. 16 x 25, 101 fig., relié toile 1953 NF 35,00

PHOTOPILES AU SÉLÉNIUM. Blet G. Théorie et constitution des photopiles. Propriétés des photopiles. Emploi des photopiles. 150 p. 11 x 16, 73 fig., relié toile, 1959 NF 11,00

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

PHYSIQUE NUCLÉAIRE APPLIQUÉE. Guillian R. Éléments de physique atomique : Structure discontinue de la matière, de l'électricité. Spectrographes et spectromètres de masse. Structure discontinue du rayonnement, éléments de mécanique ondulatoire. Les atomes, les isotopes. **Les particules et le noyau :** Détection des particules. Les particules, les accélérateurs. Formes, dimensions et moments nucléaires. Modèles de noyau. Les énergies mises en jeu dans le noyau. **L'énergie nucléaire et les radio-isotopes :** Radioactivité naturelle. Propriété des rayonnements alpha, bêta et gamma. Radioactivité artificielle. Transformations nucléaires provoquées. Fission. Réaction en chaîne. Types de réacteurs. Technologie des réacteurs. Ralentissement et diffusion des neutrons. Théories approchées des réacteurs homogène et hétérogène. Contrôle des réacteurs. Protections contre les rayonnements. Applications des radio-isotopes et des radiations. Avenir de l'énergie nucléaire. L'énergie thermonucléaire de la fusion. L'effort atomique français. 666 p. 16 x 25, 204 fig., nombreux tableaux, cartonné, 1959 NF 83,00

TECHNOLOGIE DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES. Ageron P., Bonaldi A., Gauzit N. et Reis T. Tome I. Matériaux: Rappel des notions de la physique des réacteurs. Actions de rayonnement sur la matière. Les matériaux fissiles et fertiles. Généralités sur les matériaux non fissiles. Réflecteurs pour réacteurs à neutrons. Lents, modérateurs. Réfrigérants. Absorbants et neutrons. Matériaux de protection. Matériaux de construction. 570 p. 16 x 25, 142 fig., relié toile sous jaquette, 1959 NF 69,00

INTRODUCTION AU GÉNIE NUCLÉAIRE. Kahan T. et Gauzit M. Tome I: Physique et calcul des réacteurs nucléaires. Physique atomique et nucléaire. Nucléonique. Physique du neutron (neutronique). Théorie stationnaire des réacteurs nucléaires. Théorie dynamique des réacteurs. Calcul des éléments de réacteurs. 388 p. 16 x 25, 133 fig., relié toile, sous jaquette, 1957 NF 39,00
Tome II: Contrôle et protection des réacteurs nucléaires. Détection des particules et rayonnements ionisants. Contrôle des réacteurs. Dangers des rayonnements ionisants. Écrans de protection contre les rayonnements. Énergie nucléaire à partir des éléments légers. 396 p. 16 x 25, 180 fig., relié toile, sous jaquette, 1957 NF 39,00
Tome III: Évacuation et récupération de la chaleur des réacteurs nucléaires: Évacuation de la chaleur des réacteurs nucléaires. Thermodynamique; transformation en énergie mécanique de la chaleur produite dans les réacteurs nucléaires. Descriptions succinctes des circuits thermiques de quelques réacteurs nucléaires. Contraintes thermiques. 246 p. 16 x 25, 158 fig., relié toile, sous jaquette, 1958 NF 29,00

PRÉCIS D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. Cahen G. et Treille P. Rappel des principaux résultats de la physique moderne. Éléments de physique nucléaire. Les réacteurs nucléaires. Dispositions générales des réacteurs. Dispositions des réacteurs de puissance. Les rayonnements et leurs dangers; la protection. Les matériaux consécutifs des réacteurs et leur mise en œuvre. La mesure des rayonnements. Applications industrielles de l'énergie nucléaire. Utilisation industrielle des rayonnements. 290 p. 16 x 25, 93 fig., relié toile, 1958 NF 31,00

LES CENTRALES NUCLÉAIRES. Chambadal P. (A.C. N° 321). Production, extraction et récupération de chaleur. Production de vapeurs dans les bouilleurs, dans les chaudières sans foyer, dans le réacteur. Combinaison d'un réacteur nucléaire avec un foyer à combustion. Récupération de la chaleur d'origine nucléaire à l'aide d'une turbine à gaz. 188 p. 11 x 16,5, 41 fig., 1956 NF 4,50

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. Lefort M. Atome, noyau énergie «atomique». Le noyau atomique. Les transmutations. Les grands réacteurs nucléaires actuels. Les accélérateurs. L'utilisation de l'énergie nucléaire. L'utilisation des radioisotopes. Les effets des rayonnements de grande énergie. 150 p. 16 x 24, nbr. fig. et photos, 2^e édit., 1960 NF 15,00

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. Libération et exploitation. Nahmias M.-E. Structure et constitution de la matière. Projectiles et engins de transmutation. La fission nucléaire. Les piles atomiques. Les bombes atomiques. Matières premières de l'industrie atomique. Centrales et propulseurs nucléaires. Applications des radio-éléments. Recherches atomiques. 302 p. 13,5 x 19,5, 203 fig., 1954. NF 8,40

PRODUCTION ET APPLICATIONS DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE. Piraux H. Qu'est-ce que l'énergie? Énergie

des radiations. Au sein du noyau. Les appareils de physique nucléaire. Les radio-isotopes. Les réacteurs nucléaires. Coups d'œil sur l'avenir. Tableau des réacteurs nucléaires réalisés ou en projet. Comment obtenir les radio-éléments artificiels. Protection contre les radio-isotopes. 128 p. 15 x 24, 13 fig. très nbr. photos et schémas, 1957 NF 6,00

ASPECTS ÉCONOMIQUES DES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. Reis Th. L'utilisation des réacteurs nucléaires pour la production de l'énergie électrique et des matières fissiles. L'utilisation des réacteurs nucléaires pour la propulsion. Applications des rayonnements dans l'industrie chimique. Applications des rayonnements en agriculture et pour la préservation des denrées périssables. Les réacteurs nucléaires de recherches. L'application de l'énergie nucléaire comme source de chaleur. 388 p. 16 x 25, 72 fig., 12 planches, relié toile, sous jaquette, 1958 NF 46,00

DICTIONNAIRE ATOMIQUE. Charles V. Aujourd'hui l'atome conditionne toute la vie moderne: expériences nucléaires, colloques scientifiques, conférences politiques: l'atome est au premier plan de toutes leurs actualités. Au technicien non-atomiste, cet ouvrage donne toute sa signification à un vocabulaire de plus en plus riche. Pour le spécialiste, ce sera un instrument de référence permanent. Un important index en fin de volume donne les équivalences des principaux termes, en anglais, en allemand, en russe. 318 p. 11 x 21, cartonné, 1960 NF 12,00

PETIT LEXIQUE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE. Piraux H. 700 mots-clés des termes et expressions particuliers à l'énergie atomique. De nombreuses indications numériques concernant la radioactivité. Tableaux synoptiques, 140 p. 13,5 x 18, 2^e édit. 1960 NF 11,00

LES APPLICATIONS DE L'EXPLOSION THERMO NUCLÉAIRE. Rougeron C. La naissance de la bombe Ses effets. L'hydraulique thermonucléaire. La climatologie thermonucléaire. L'industrie chimique et extractive. La guerre terrestre. La guerre navale. La guerre aérienne. Économie et puissance. 308 p. 14 x 19, 1956. NF 6,00

LE PÉTROLE THERMONUCLÉAIRE. Rougeron C. L'essai «Rainier». Les effets de l'explosion souterraine. Le perfectionnement de l'outil explosif. Le développement de ressources énergétiques. Pétrole, schistes et charbons. Le transport. L'indépendance énergétique de l'Occident. 180 p. 14 x 20, 1959 NF 6,90

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DANS LE MONDE. Reis T. Les problèmes de l'énergie et de l'énergie nucléaire. Historique, organisation, programmes, ressources et réalisations dans le domaine de l'énergie nucléaire dans différents pays. Conclusions. Références bibliographiques. 296 p. 16 x 25, 44 fig., relié toile, sous jaquette couleurs, 1957. NF 29,00

L'INDUSTRIE ATOMIQUE EN FRANCE ET DANS LE MONDE. Benoit C. Quelques données techniques. L'atome, réservoir d'énergie. La fission nucléaire. Les réacteurs. Rayonnement et protection. Utilisation de la radio-activité. Les matières premières. Les facteurs économiques. Les besoins: La famine énergétique. Les moyens mis en œuvre. Les choix à effectuer. Les politiques de développement: Les programmes nationaux. L'action internationale Conclusion: L'initiative privée devant les perspectives nucléaires. 159 p. 15 x 22, 22 fig., 1959 NF 8,80

Les commandes doivent être adressées à la LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, Paris (9^e). Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme 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, soit 10 % (avec un minimum de NF 1,00). Envoi recommandé: NF 0,60 de supplément.

Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, PARIS (9^e)

NUMÉRO HORS SÉRIE

L'ÉNERGIE

SOMMAIRE

● ÉDITORIAL	8
● LA CONQUÊTE DE L'ÉNERGIE	10
● LE CHARBON	26
● L'ÉLECTRICITÉ	40
● L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE.....	52
● LES CENTRALES THERMIQUES	75
● LES CENTRALES NUCLÉAIRES	92
● PÉTROLE ET GAZ NATUREL.....	106
● USINES MARÉMOTRICES	128
● DEUX TECHNIQUES D'AVANT-GARDE	133
● VENT, SOLEIL ET CHALEUR TERRESTRE	140
● VERS LA FUSION NUCLÉAIRE, SOURCE INÉPUISABLE D'ÉNERGIE.....	146

Directeur général :
Jacques Dupuy

Directeur :
Jean de Montulé

Rédacteur en chef :
Jean Bodet

Direction, Administration,
Rédaction : 5, rue de
La Baume, Paris-8^e. Tél. :
Balzac 57-61. Chèque postal
91-07 PARIS. Adresse télé-
légr. : SIENVIE PARIS.

Publicité : 2, rue de La
Baume, Paris-8^e. Tél. : Ely-
sées 87-46.

New York : Arsène Okun,
64-33, 99th Street Forest
Hills, 74 N. Y. Tél. : Twining
7.3381.

Londres : Louis Bloncourt,
17 Clifford Street, London
W. 1. Tél. : Regent 52-52

Washington : Science Ser-
vice, 1719 N Street N.W.
Washington 6, D.C. (U.S.A.)

(Photographies en couleurs Baranger)

TARIF DES ABONNEMENTS

POUR UN AN :	France et Union Fr ^{se}	Étranger
12 parutions	18,— NF	22,— NF
12 parutions (envoi recommandé).....	25,50 NF	30,— NF
12 parutions plus 4 numéros hors série	30,— NF	35,— NF
12 parutions plus 4 numéros hors série (envoi recd ^e)	40,— NF	45,— NF

Règlement des abonnements: SCIENCE ET VIE, 5, rue de La Baume-Paris. C.C.P. PARIS 91-07 ou chèque bancaire. Pour l'Étranger par mandat international ou chèque payable à Paris. Changement d'adresse : poster la dernière bande et 0,30 NF en timbres-poste.

Belgique et Grand-Duché (1 an) Service ordinaire **FB 180**
Service combiné **FB 330**

Hollande (1 an) Service ordinaire **FB 200**
Service combiné **FB 375**

Règlement à Édimonde, 10, boulevard Sauvenière, CCP. 283.76, P.I.M. service Liège.

Éditorial

IL n'y a pas plus de 150 ans que s'est produit dans l'histoire de l'humanité une coupure déterminante. L'ère moderne naissait, et cette naissance se faisait sous le signe du charbon associé à la machine à vapeur. Dans le monde occidental tout au moins, l'énergie disponible par habitant augmentait subitement, l'industrie se substituait à l'artisanat, les navires à vapeur sillonnant les mers intensifiaient les échanges, les réseaux ferrés quadrillaient les continents, la machine bouleversait les habitudes de vivre et de penser.

Après des millénaires de stagnation et de bas niveau de vie, d'esclavage, d'animaux de trait, de feux de bois ou de tourbe, de rudimentaires moulins à vent ou à eau, le bien-être de masse s'installait avec la révolution industrielle. Le ^{xix}e siècle découvrait ce que les techniciens appellent les « esclaves mécaniques ».

L'emploi massif de l'énergie est donc relativement récent. Le rythme accéléré de l'expansion industrielle qui a suivi n'a pas manqué de soulever une inquiétude. Au charbon s'étaient ajoutés le pétrole, le gaz naturel et l'électricité d'origine hydraulique, le développement de cette dernière ne pouvant qu'être limité. Ne viendrait-il pas un jour, peut-être proche, où les sources principales d'énergie feraient défaut ? Bien que la production ait toujours été à la hauteur des besoins, les réponses des techniciens et des économistes s'entouraient de pessimisme.

Ce fut le cas en particulier après la dernière guerre mondiale, lorsque, pendant dix ans, une psychose se développa, celle de la menace d'une famine énergétique. Elle pesait sur le monde en général et spécialement sur l'Europe Occidentale. Là, les populations étaient groupées à haute densité sur des territoires exigus dont elles allaient rapidement épuiser les réserves de charbon et du peu d'hydrocarbures qu'on y avait découvert. Leurs ressources hydrauliques étaient très insuffisantes et les plus économiques d'entre elles étaient déjà aménagées. Il fallait résolument s'orienter vers l'exploitation d'autres énergies : marémotrice, maréthermique, géothermique, solaire, pousser dans ces directions la recherche industrielle pour rendre les prix de revient compétitifs. L'énergie atomique n'était pas oubliée, au contraire, et les moins audacieux des novateurs faisaient dresser dans l'enthousiasme des plans grandioses de multiplication de centrales nucléaires.

Les problèmes énergétiques sont aujourd'hui plus que jamais à l'ordre du jour. Mais leur aspect s'est profondément transformé. A la pénurie a brusquement fait place l'abondance, au point que l'on a pu parler de raz-de-marée énergétique. La surproduction a frappé d'abord les charbonnages de Belgique, particulièrement vulnérables, s'est étendue à l'Allemagne, puis à la France. Des dizaines de millions de tonnes de

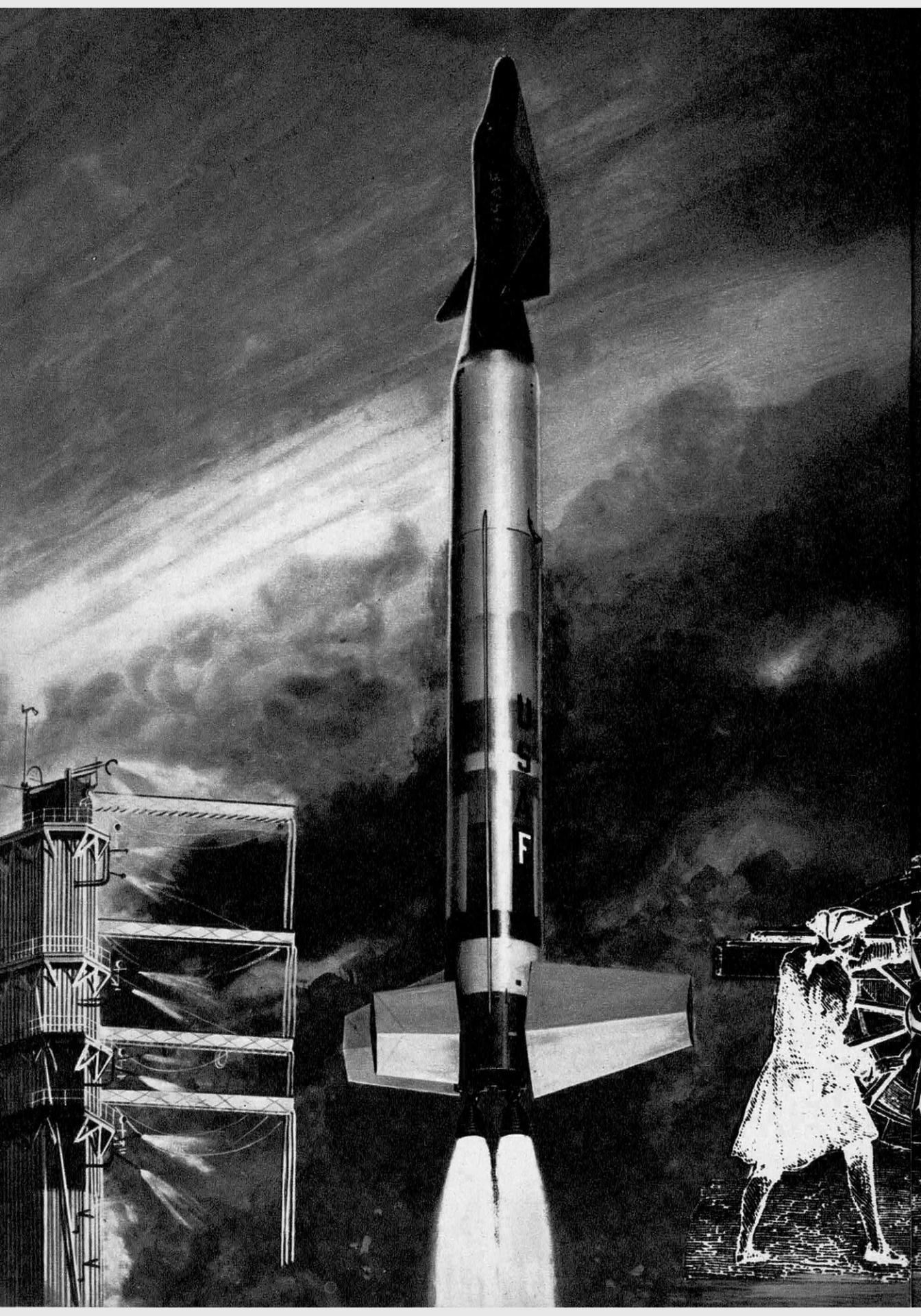
houille sont amassées sur le carreau des mines. Le charbon-roi a reculé devant l'offensive du pétrole et du gaz naturel. Les campagnes de prospection ont révélé qu'il y a du pétrole ou du gaz à peu près partout, dans tous les terrains sédimentaires, même en l'absence d'indices superficiels, comme l'a prouvé le Sahara dont la « formidable inutilité » s'est muée en source de richesses.

Il est évident que tous les gisements ne sont pas également riches et l'on ne peut trouver partout l'équivalent des milliards de tonnes de pétrole de Koweït ou de mètres cubes de gaz naturel de Hassi R'Mel, peut-être le premier gisement mondial. Mais la menace d'un épuisement prochain des réserves de combustibles fossiles est maintenant vaine. A la concurrence pétrole-charbon s'ajoute celle pétrole-gaz naturel. Le gaz de Lacq, qui fait de la France le second producteur européen après l'U.R.S.S., parvient jusqu'à Dunkerque et Strasbourg et séduit l'industrie aux dépens du fuel-oil. Celui du Sahara liquéfié va déferler sur l'Europe par les méthaniers, en attendant le gazoduc transméditerranéen. De l'Est viendront d'autres difficultés avec le réseau géant de pipelines que l'U.R.S.S. établit vers ses satellites et pousse vers l'Occident pour offrir pétrole et gaz à des prix imbattables.

L'Europe doit chercher un nouvel équilibre énergétique. Les charbonnages, sur lesquels plane le spectre du chômage, tiennent une place irremplaçable dans l'économie française. S'il est inéluctable d'alléger des exploitations déficitaires, le maintien de leur capacité de production et l'augmentation de la productivité assurera le volant indispensable à la sécurité des approvisionnements au cas, toujours possible, d'un renversement de la conjoncture et évitera les souffrances sociales d'une reconversion hâtive. Mais c'est l'évolution du prix de l'unité énergétique, le kilowatt-heure, qui déterminera dans les décades à venir la part revenant à chaque source primaire dans la production, sur le plan national comme sur le plan mondial, l'énergie bon marché conditionnant le développement de l'industrialisation.

Quelle sera celle de l'énergie nucléaire?

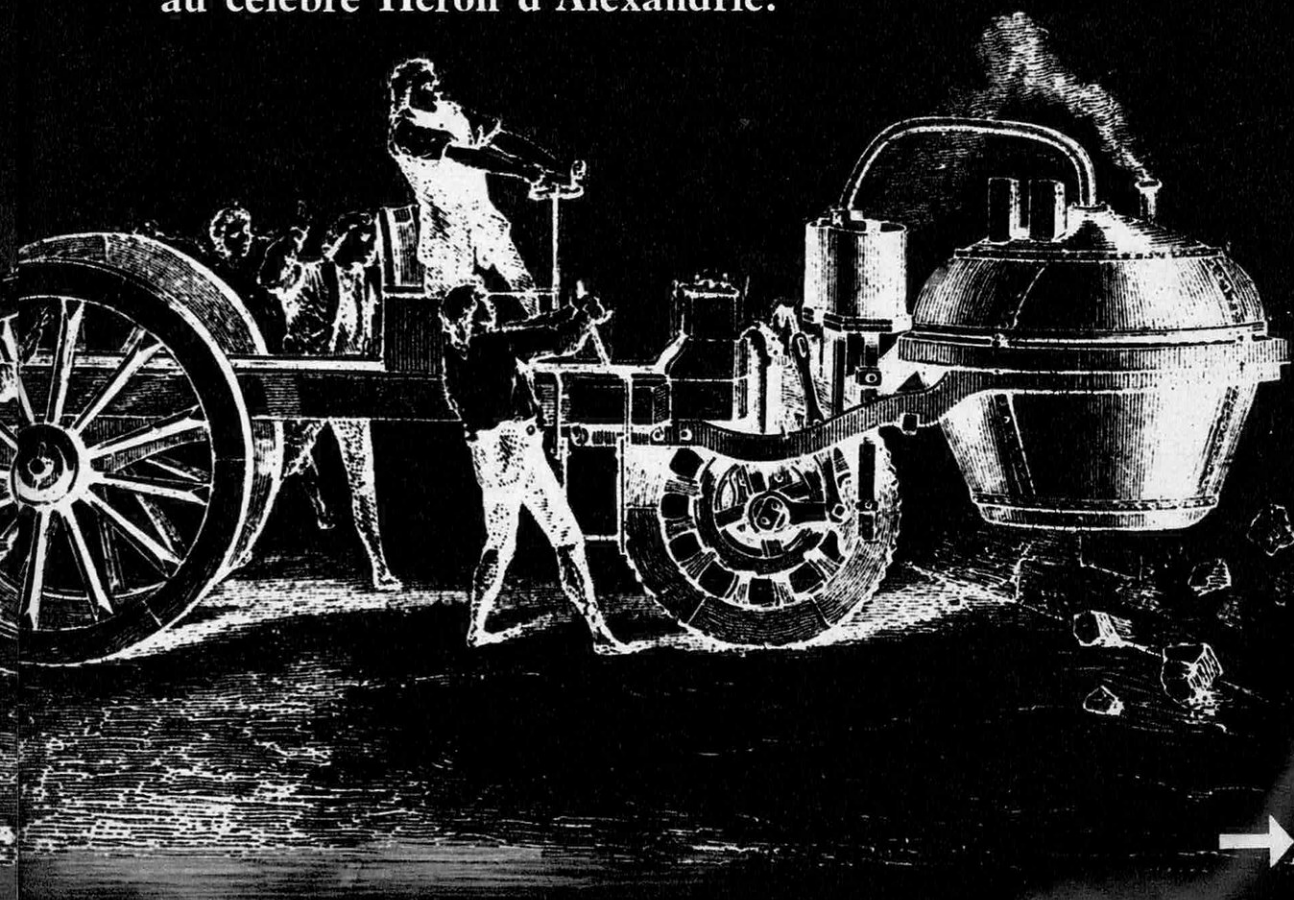
Certainement importante à long terme, et les experts lui attribuent le quart de la production mondiale d'énergie dans 25 ans au plus. D'ici là, le progrès technique aura abaissé le coût d'exploitation dans de si larges proportions que les centrales nucléaires géantes remplaceront progressivement celles du type classique les plus perfectionnées. Encore ne s'agit-il que de fission de noyaux lourds. La fusion de noyaux légers ouvrira des perspectives bien plus amples et écartera sans doute à jamais la menace d'une pénurie d'énergie, quelle que soit l'expansion démographique du globe.



la conquête de l'énergie

TOUTE l'Antiquité : Rome, la Grèce, l'Égypte hellénistique, bénéficiaires par ailleurs d'une civilisation raffinée, a dédaigné les applications de la science, considérées comme « arts mécaniques et serviles ».

Tout au plus en tirait-on des amusettes. Sur la foi de Léonard de Vinci, nombre d'inventions, ou « théorèmes » sans utilité pratique, ont été attribuées au célèbre Héron d'Alexandrie.



Le moteur musculaire

Quelle était donc la force motrice employée par l'Antiquité ? Celle des animaux de trait, des animaux porteurs et surtout celle des esclaves. Le tournage du moulin à meules était réputé comme le plus meurtrier des supplices quotidiens; le travail de terrassement des légions, construisant la « camp romain », est bien connu. Hérodote, que l'on peut croire quelquefois, affirme que Chéops fit mourir à la peine 100 000 hommes pour construire la Grande Pyramide.

L'effort humain, quand on peut l'accumuler en nombre, est plus nuancé que celui des machines; on l'emploie encore pour les grosses besognes de précision, par exemple pour haler un pont métallique ou déplacer un petit immeuble monté sur rouleaux. Individuellement, cet effort peut atteindre des chiffres inattendus; plusieurs portefaix ont réussi à porter 400 kg. On employait naguère, à Marseille, un chargeur à moteur pour placer des sacs de 100 kg sur la nuque des porteurs en chair et en os, ce qui motiva une intervention de l'Inspection du travail.

La *puissance* fournie (produit de l'effort par la vitesse) est, en revanche, très faible. Un cycliste, pédalant au point fixe pour entraîner une dynamo, fournit avec peine une puissance de 10 kgm par seconde, service continu, ce qui correspond à 80 W aux balais de la dynamo. Le gros pelletage de terrassements représente plus de 100 000 kgm par jour, le traînage de la charrette à bras 250 000 kgm. Ce sont des cas limites.

Il est naturellement impossible de savoir si les Anciens tiraient meilleur parti de la force musculaire humaine, mais on peut en douter à voir comment ils ont utilisé celle des animaux.

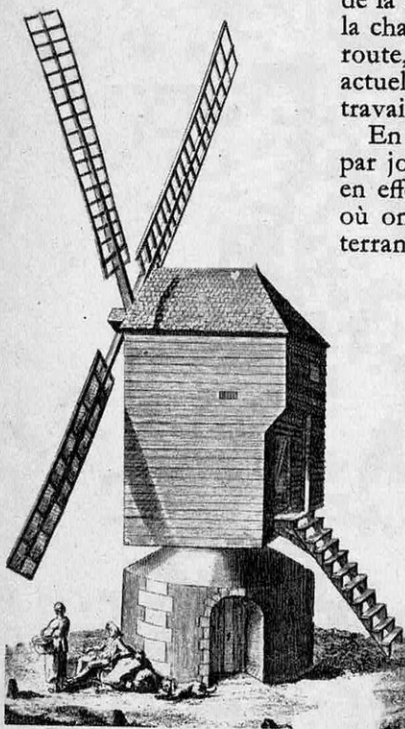
Les Anciens, nous apprend le commandant Lefebvre-Desnouettes, attelaient à bricole haute, comprimant la trachée et gênant cruellement la respiration. De là cet aspect « noblement relevé » des chevaux antiques, perpétué par la sculpture. L'empereur Justinien, au VI^e siècle, fixait à 500 kg la charge maximale des chariots à quatre roues ou *carpentaria* à deux chevaux des postes d'Empire. L'invention du harnais d'épaules et de la bricole basse, vers l'an 1000, ont permis d'accroître considérablement la charge tractée. Il n'est pas rare, avec une charrette sur pneus, sur bonne route, de voir aujourd'hui un seul cheval tirer 1 000 kg. On compte actuellement sur 1 million de kilogrammètres par jour pour un cheval travaillant 200 jours par an.

En ce qui concerne le travail des bovidés, on l'évalue à 700 000 kgm par jour pour le bœuf à raison de 173 jours par an. Il faut tenir compte, en effet, de la stabulation, beaucoup plus prolongée dans les pays froids, où on évalue ces statistiques. Il est possible que les bestiaux méditerranéens arrivent à des totaux annuels sensiblement supérieurs.

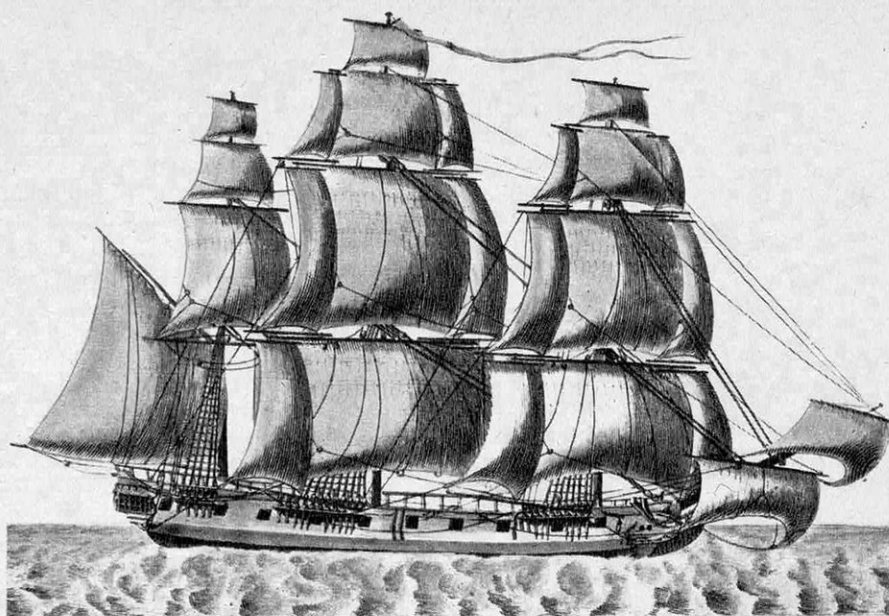
Roues à marée et moulins à vent

Il semble que la puissance hydraulique ait été utilisée de toute antiquité, mais à très petite échelle. Les indigènes de Bali emploient une palette oscillante, repoussée par une cascade et constituant un véritable moteur à piston. La grande roue des fellahs du Nil, élevant l'eau dans ses godets, est un des types les plus anciens de « roue en dessous » — c'est-à-dire où l'eau circule sous la roue — qui convient aux courants importants à faible pente; la *roue de côté* est classique dans nos campagnes, tandis que la *roue en dessus*, avec son filet d'eau lancé tangentiellement sur les aubes hautes, convient aux ruisselets de montagne.

L'*usine marémotrice*, toujours de petit calibre, est certainement fort ancienne. Des installations archaïques existent sur nos côtes



**Du vent
dépendit
longtemps
le sort
des empires
maritimes**



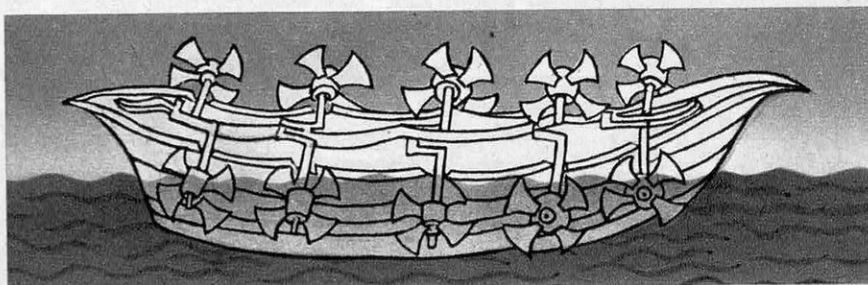
océaniques, avec leur bassin de remplissage et leur roue assez primitive, que l'on peut remplacer par une turbine de basse chute. Des moulins antiques existaient en Grèce, en particulier dans le détroit de l'Europe, où, dit-on, Aristote se serait noyé; le courant y est rapide et s'inverse assez inexplicablement quatorze fois par jour.

Des essais de roues de navires entraînées par la marée ont été faits dans la Tamise; la navire était ancré au point fixe, évitant au renversement de marée; l'eau poussait les palettes, faisant tourner les roues. La puissance recueillie était malheureusement quasi nulle.

En Occident, le vent semble avoir été employé pour les moulins depuis le bas Moyen Age. Les anciennes estampes nous montrent les crêtes, aujourd'hui urbaines, du Parisis, couvertes de moulins à ailes. L'inconvénient de l'énergie éolienne est qu'elle ne se canalise pas spontanément dans des « lits », comme l'énergie hydraulique, où un simple barrage suffit à capter l'énergie d'un immense bassin géographique. Ceci ne gênait pas nos pères, qui se contentaient de petites puissances, mais est un obstacle majeur à la création de grandes centrales aérodynamiques modernes.

Le moulin à vent hollandais, utilisé pour l'épuisement des eaux, tend à disparaître, et nombre de spécimens ont été classés par le gouvernement néerlandais. Ils ne comportent pas de pompes, mais, assez curieusement, une large vis d'Archimède, inclinée, construite en planches clouées hélicoïdalement autour d'un axe. L'arbre des ailes entraîne, par un renvoi, l'arbre de la vis, qui dégorge une quantité d'eau énorme sous une faible hauteur d'élévation. La formule actuelle consiste à creuser des canaux

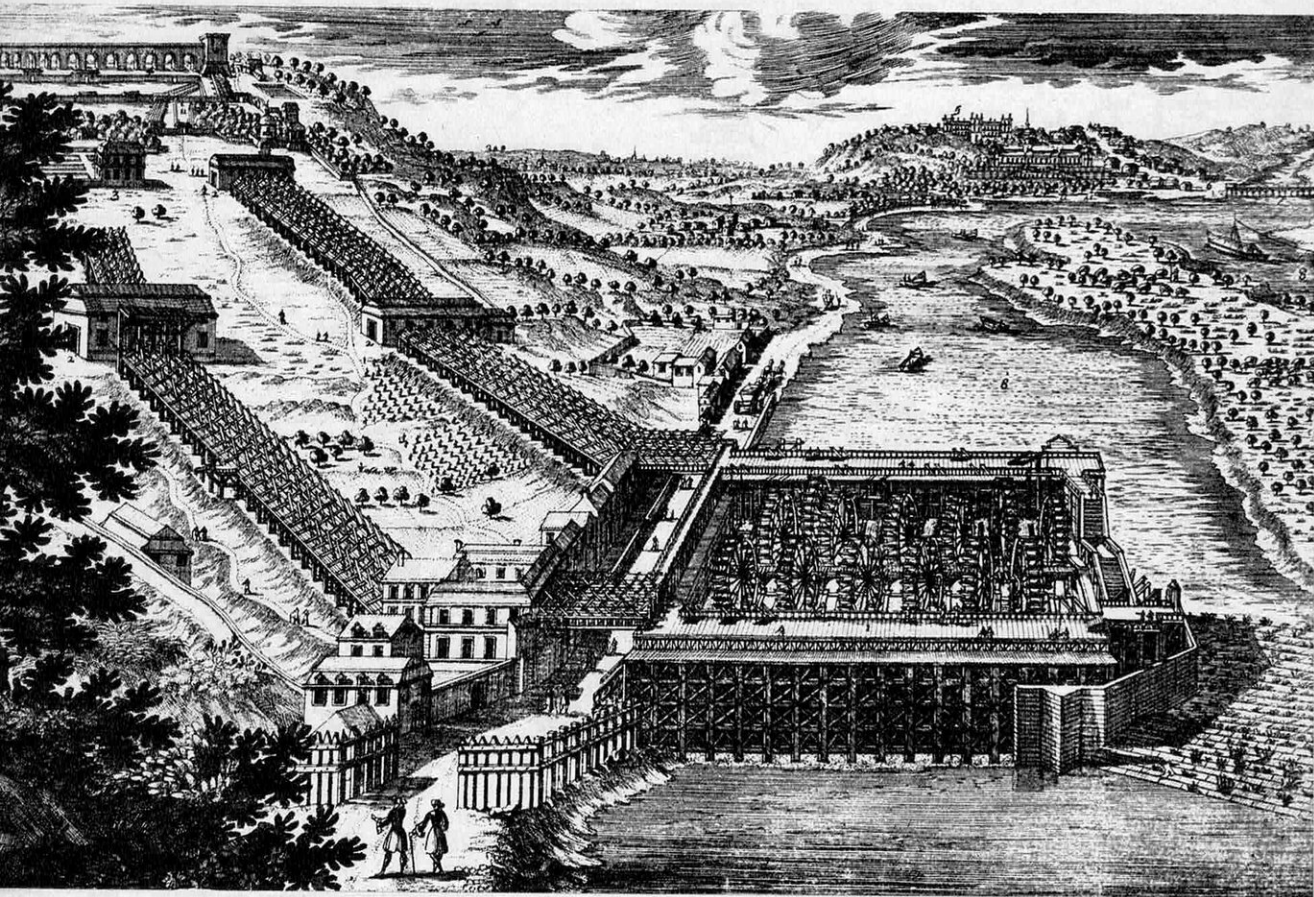
**Bateau à roues
mues
par manivelles
d'après
une gravure
de 1472**



d'écoulement suffisamment profonds pour amener les eaux de toute une province à une puissante station de pompage électrique, capable d'assurer la baisse du niveau général, même par temps d'orage.

Il convient, au chapitre du vent, de ne pas oublier la voile, qui est vieille comme le monde. La destinée des empires tenait aux caprices aérodynamiques de l'atmosphère. L'aventure, dit la tradition, coûta la vie à Iphigénie. Le désastre de l'« Invincible Armada » est presque contemporain. Les dernières grandes courses de voiliers n'ont cessé qu'il y a quelques années. Les navires partaient d'Australie, doubler le cap Horn et ralliaient en trois mois environ les parages scandinaves.

La machine élévatrice de Marly à 34 roues de 12 m de diamètre

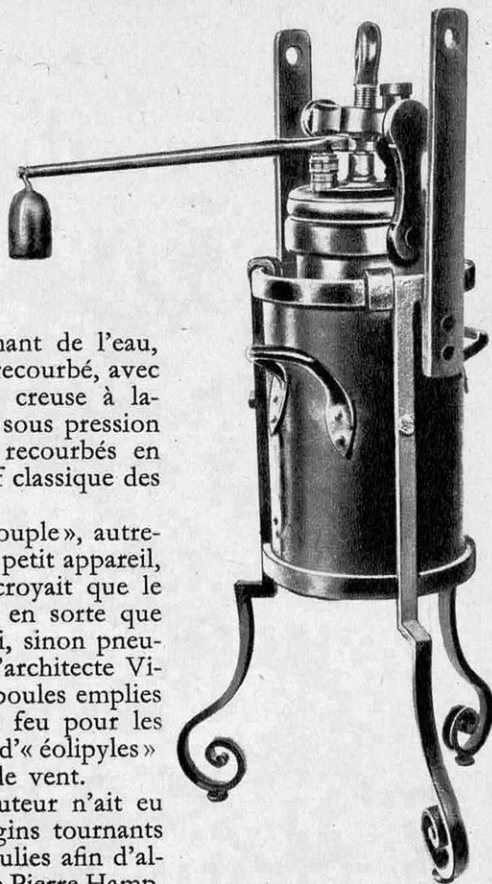


Denis Papin et les premières machines à feu

La première « force motrice » moderne domestiquée par l'homme fut la vapeur. Les noms de Papin, de James Watt, de Carnot viennent aux lèvres... Mais que d'immenses tâtonnements précédèrent leurs découvertes !

Nous retrouvons Héron d'Alexandrie, tout à l'origine..., avec une authentique turbine à réaction, mue par la vapeur ! « Faire tourner une petite boule au moyen d'une marmite chauffée », tel est le titre du chapitre qui confère à Héron une « antériorité » certaine sur nos centrales !

**La célèbre marmite de Papin
avec sa soupape de sûreté
réglée par un contrepoids coulissant**



La « marmite chauffée », contenant de l'eau, communique par un tube pointu, recourbé, avec une minuscule sphère métallique creuse à laquelle il sert de pivot. La vapeur sous pression s'échappe par deux petits tubes recourbés en sens inverse, sur le principe réactif classique des tourniquets d'arrosage.

On croira sans peine que le « couple », autrement dit l'effort, développé par ce petit appareil, était des plus modestes. Héron croyait que le feu métamorphosait l'eau en air, en sorte que sa sphère tournante était, pour lui, sinon pneumatique, du moins « éolienne ». L'architecte Vitruve décrit également de petites boules emplies d'eau qu'on plaçait au-dessus du feu pour les faire tourner; il leur donne le nom d'« éolipyles » où l'on retrouve bien la notion de vent.

Il est remarquable qu'aucun auteur n'ait eu l'idée de compléter ces petits engins tournants par un jeu démultiplicateur de poulies afin d'alléger, suivant la belle expression de Pierre Hamp, la « peine des hommes ». Faut-il rappeler qu'Archytas de Tarente, inventeur d'une certaine « colombe à air comprimé » dont le secret est malheureusement perdu, immortalisa son nom par la découverte... de la crécelle ?

Franchissons les siècles pour trouver, à la suite de la Renaissance, une plus juste conception du rôle de la force motrice.

Salomon de Caüs, architecte français qui publia en 1615 un certain « Traité des forces mouvantes », décrit une machine à élever l'eau, composée d'un ballon de cuivre rempli d'eau et équipé d'un tuyau vertical partant du fond. Quand on place le ballon sur le feu, la vapeur produit une forte pression, qui oblige l'eau à sortir par le tube. C'est une machine élévatoire si l'on veut, mais une machine à élever l'eau bouillante !

En 1629, Giovanni Branca, architecte de l'église de Lorette, décrit un éolipyle relativement puissant, qu'il a eu la bonne idée d'équiper d'un engrenage réducteur. Il s'agit, cette fois, non plus d'une turbine à réaction, mais à « action », le jet de vapeur agissant par percussion sur les ailettes d'une roue-turbine. L'engrenage permet de faire mouvoir un arbre à cames qui soulève un pilon dans un mortier.

Les Anglais voudraient que la machine à vapeur ait été inventée par le marquis de Worcester, au temps de Cromwell, sans fournir, de cette prétention, la moindre justification valable. Seul mérite de passer à la postérité, le titre de l'opuscule du marquis, dont l'enflure contraste avec la modestie habituelle aux génies véritables : « Description exacte de la plus étonnante machine hydraulique, inventée par le très honorable Edouard Somerset, marquis de Worcester, digne d'être loué et admiré. »

Denis Papin naquit à Blois en 1647. Il travailla avec Huygens, sans grand succès, au projet de la machine de Marly, et publia en 1674 un petit traité intitulé : « Nouvelles expériences du vide, avec la description des machines servant à le faire. » Ainsi, dès le départ, Papin était fasciné par cette « force » particulière, le vide, et la vapeur ne fut jamais pour lui

qu'un fluide condensable, essentiellement capable de produire le vide.

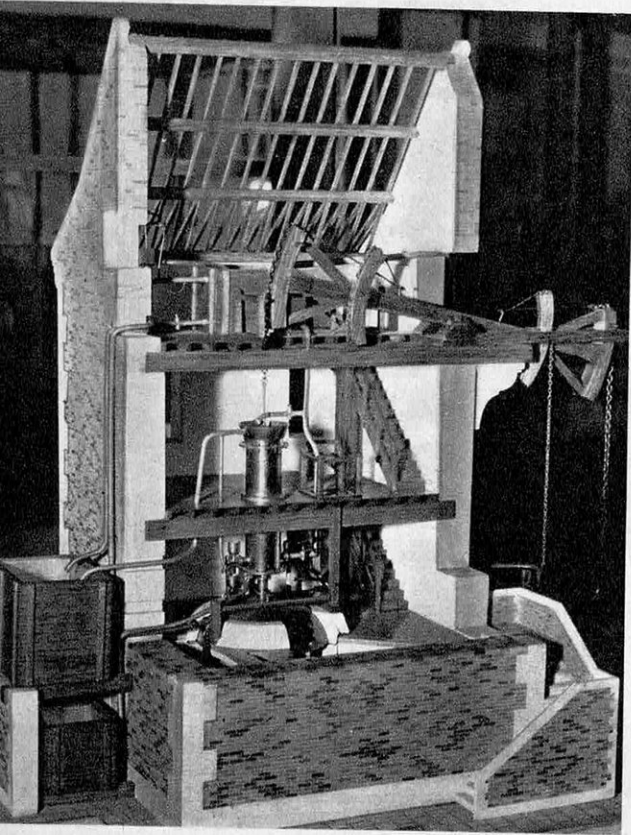
Après différents avatars plus ou moins heureux, nous retrouvons Papin chez le landgrave Charles, électeur de Hesse, à Marburg. Papin, en effet, était protestant; il lui était interdit de faire carrière dans sa patrie. A cette époque, il avait déjà à son actif la « marmite de Papin » ou « digesteur », autrement dit l'autoclave. Ajoutons-y cet auxiliaire essentiel, la soupape de sûreté, réglable au moyen d'un poids coulissant sur un levier.

A Marburg, Papin inventa... un moteur à poudre, qui ne préfigure que de loin nos moteurs à explosion actuels. Un peu de poudre, allumée dans un corps de pompe, procure, après refroidissement, une forte succion — toujours le bienheureux vide — qui permet d'aspirer un piston,

L'idée, à la vérité, venait de l'abbé Hautefeuille et de Huygens. Papin allait se montrer entièrement original en substituant à la poudre une petite quantité d'eau que l'on vaporisait en plaçant un brasier sous le cylindre : la vapeur soulevait le piston; on retirait le brasier; la vapeur se condensait, aspirant le piston : c'était la course motrice; et ainsi de suite.

Combien de « coups » pouvait donner cette primitive machine ? Une soixantaine à l'heure, paraît-il ! En outre, les pertes de chaleur étaient prohibitives. Aussi passa-t-elle inaperçue. Elle contenait pourtant en germe le principe de la machine à basse pression de Watt qui allait lancer l'Angleterre, dès le XVIII^e siècle, en pleine aventure industrielle.

Le premier « moteur » : James Watt



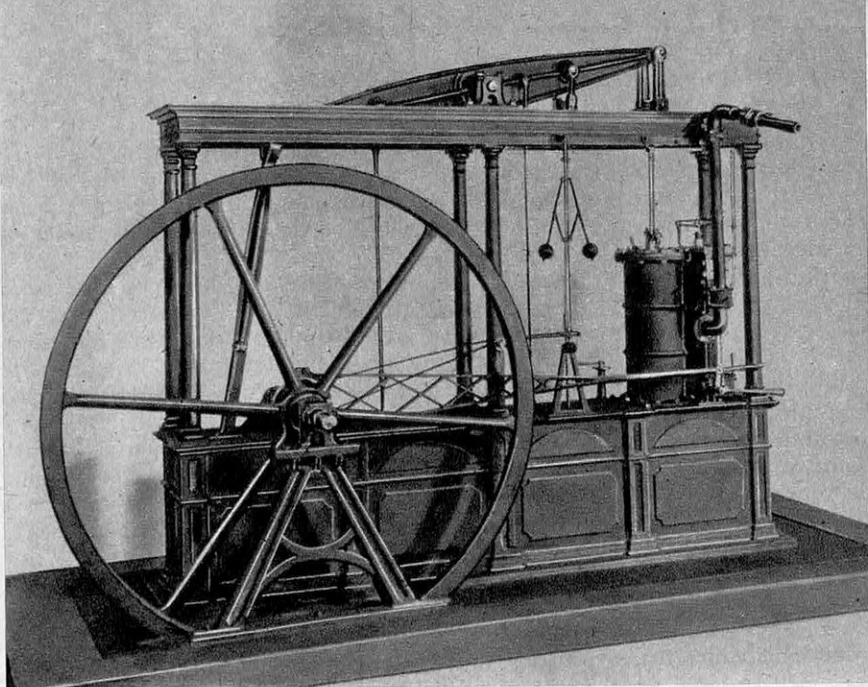
La machine de Newcomen remplaça les manèges de chevaux pour évacuer l'eau

Papin était mort dans la misère, à une date inconnue, vers 1715; mais ses idées n'étaient pas passées inaperçues en Angleterre, où le problème de l'«exhaure» (épuisement des eaux) des mines était d'importance nationale. Ceci allait retarder de près de soixante ans la découverte du premier « moteur » à vapeur, car les Anglais n'avaient pas besoin de rotation, mais seulement du mouvement alternatif des pompes.

Un serrurier du Devonshire, Newcomen, réunissant les idées de Papin et de son compatriote Savery, eut le mérite de construire la première machine à vapeur réellement utilisable. Son mérite — une idée de simple bon sens — consista à séparer la chaudière du cylindre, auquel on la réunit par un tuyau à robinet; pour refroidir le cylindre, au moment d'obtenir la condensation, on se bornait à arroser celui-ci avec de l'eau froide, puis, plus tard, à provoquer la condensation par un jet intérieur.

Pour primitive qu'elle fût, cette machine de Newcomen, avec son gigantesque balancier de renvoi, remplaça avec avantage les manèges de chevaux pour l'exhaure des mines. C'est la première conquête incontestable de la force motrice. Quels perfectionnements allait lui apporter le grand James Watt ? Le condenseur extérieur, avec ses diverses pompes de service, la notion de mouvement rotatif, avec une transmission (parallélogramme, balancier, bielle), à la vérité assez compli-

**La machine
à vapeur à basse
pression de Watt
avec son régulateur
à boules**



quée... On serait tenté d'y adjoindre la distribution par tiroir à excentrique, mais Watt en partage le mérite, s'il faut en croire la légende... avec un apprenti génial et paresseux, Humphrey Potter, qui imagina un système à ficelles (sic) pour s'épargner la fastidieuse manœuvre des robinets !

Quand James Watt mourut, on calcula que ses machines, dans le seul Royaume-Uni, remplaçaient le travail musculaire de 30 millions d'ouvriers.

1800 : l'automobile à vapeur

1804 : les chemins de fer

La machine de Watt était essentiellement un engin à basse pression — de l'ordre de deux atmosphères — et la fraction motrice résultant de la suction au condenseur représentait une part importante du travail fourni.

Tout autres sont les conditions dans une machine à haute pression — 8 à 10 kg maximum, à l'époque — telle que la conçut Cugnot, d'abord, avec son fardier à vapeur (1770), puis un simple ouvrier charron de Philadelphie, Olivier Evans. Ici, la poussée motrice, sur le piston, est très considérable et il devient préférable, pour des raisons d'économie, de supprimer le condenseur.

On connaît le camion de Cugnot, actuellement remis au Conservatoire des Arts et Métiers de Paris, et dont l'idée originale remontait du reste à un officier italien nommé Planta; il est remarquable, tout comme le bateau à vapeur de Jouffroy et la machine de Watt, par l'extrême complexité de la transmission mécanique des pistons à la roue : cliquets, fléau basculant, oscillateurs circulaires, etc.

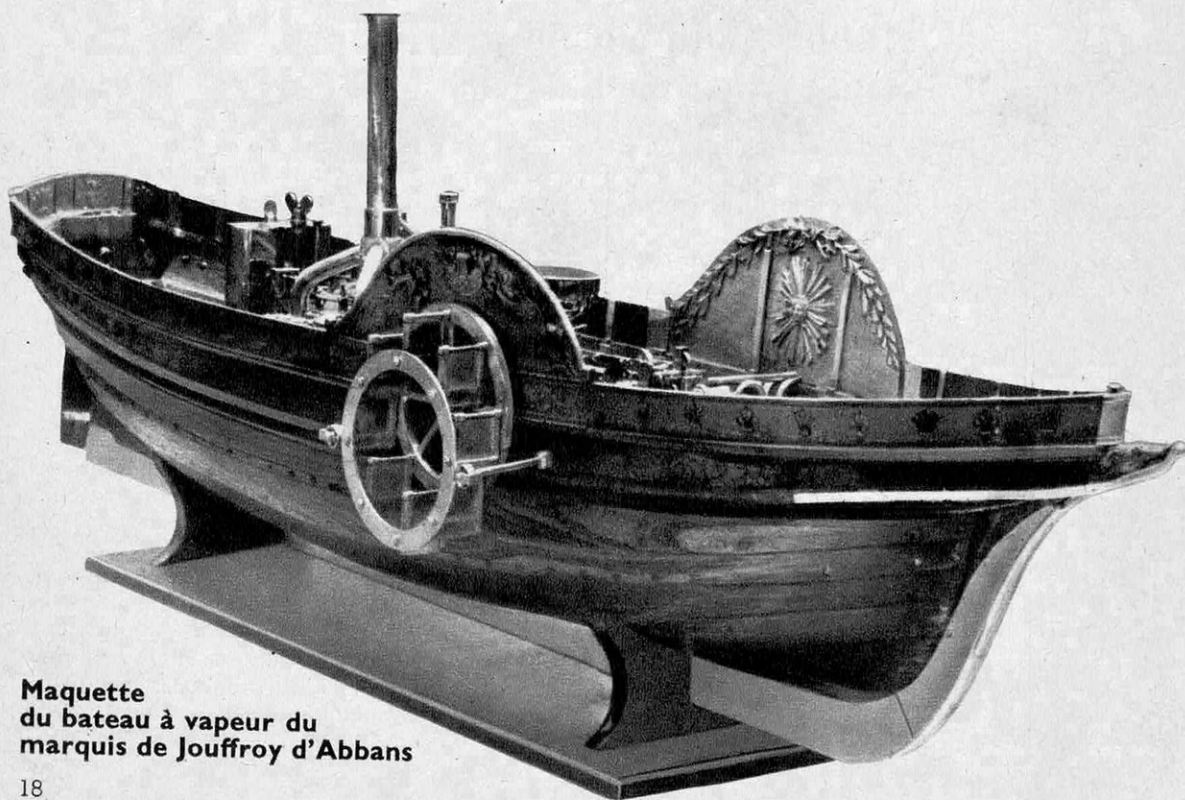
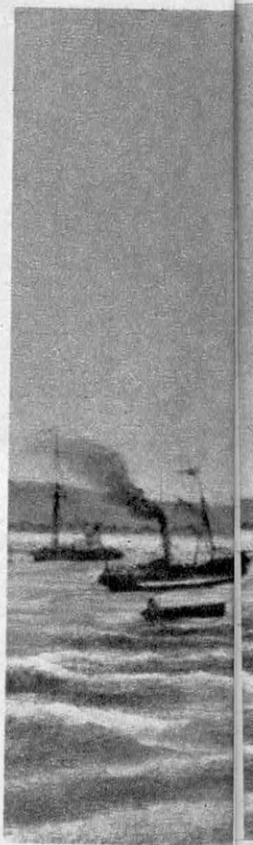
Olivier Evans poussa les essais jusqu'à dix atmosphères et appliqua avec succès sa machine aux moulins à farine. Il l'utilisa ensuite, avec des résultats mitigés, à la propulsion des véhicules, si bien qu'on put voir, en 1800, une voiture à vapeur circuler dans les rues de Philadelphie ! Evans sollicita l'autorisation de créer un service de diligences à vapeur, ce qui lui fut accordé non sans réticences, et vu, disait un membre de la commission, que « le cher Olivier n'a pas la tête bien saine » !

Nonobstant cette appréciation peu flatteuse, les « cars » à vapeur d'Evans roulèrent, ou plutôt ils auraient roulé très convenablement... si l'on eût possédé, à l'époque, des bandages pneumatiques, capables d'amortir les chocs violents imposés par les dénivellations de la route aux roues et au mécanisme.

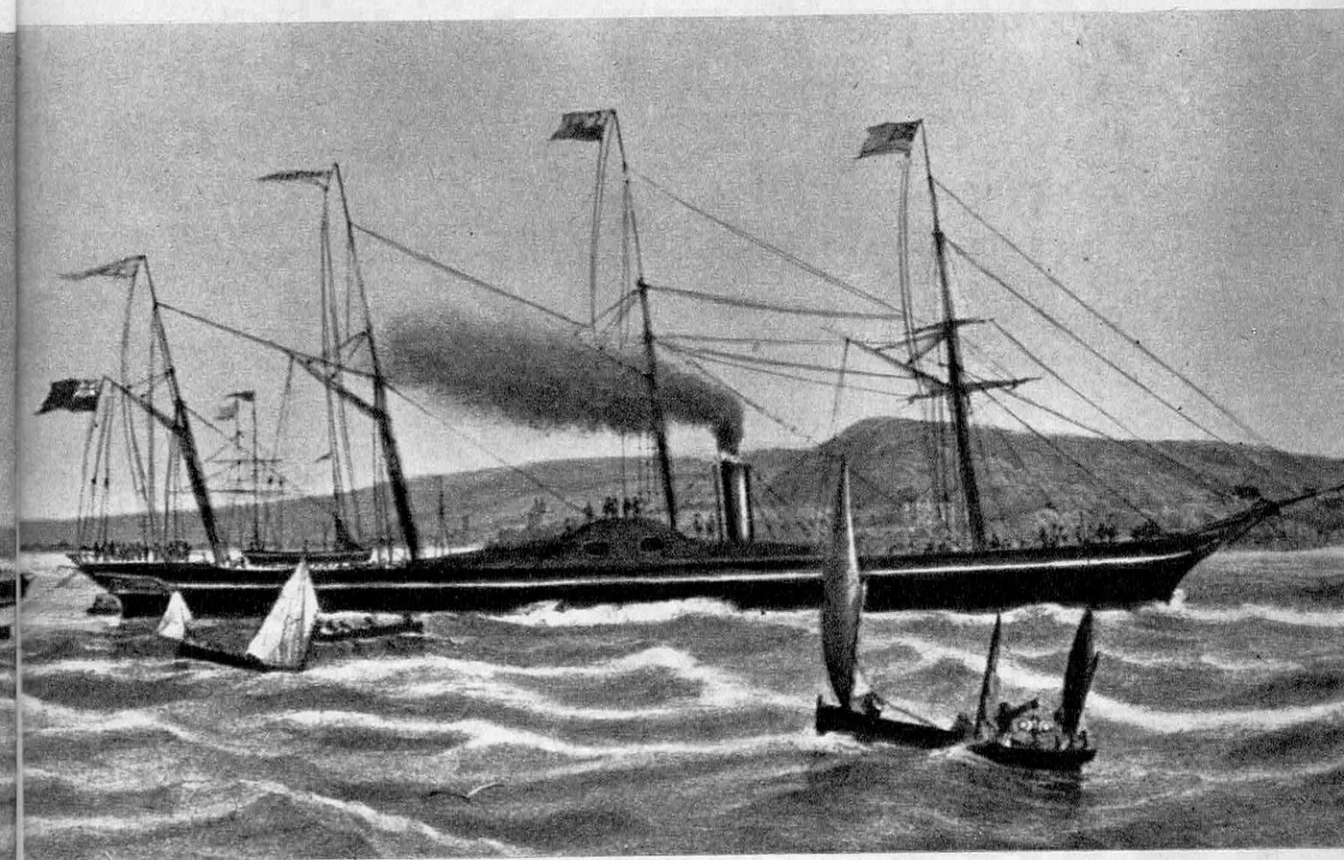
En Angleterre, les brevets d'Evans furent repris par deux constructeurs, Trevithick et Vivian, qui construisirent une curieuse voiture de poste à vapeur, offrant plusieurs dispositions véritablement modernes : moteur à grande vitesse avec transmission par engrenages, etc. Bien entendu, les roues du véhicule ne tinrent pas mieux sur les routes anglaises, mais Trevithick et Vivian eurent une idée géniale : ils lancèrent leurs engins automoteurs sur des rails, tels qu'il en existait depuis plusieurs dizaines d'années dans les mines anglaises. Tel fut l'authentique début des chemins de fer, ou plutôt de la locomotive à vapeur, dont l'histoire se ramène à un accroissement constant du poids, de la puissance, du rendement et de la vitesse.

Les premiers essais de bateaux à vapeur sont dus au marquis de Jouffroy d'Abbans. Puis vint Fulton, dont les propositions, refusées par le Premier Consul, connurent un meilleur succès en Amérique. Les premières machines marines furent dotées d'un balancier, comme la machine de Watt, voire d'un balancier renversé, disposition que justifie dans une certaine mesure la nécessité d'attaquer l'arbre horizontal des roues à aubes.

Dans la marine et les centrales, la machine à pistons a largement reculé devant la turbine, celle-ci établie en plusieurs corps afin d'étager la détente. Beaucoup moins souple que les engins à pistons, la turbine exige des dispositions spéciales : réducteurs de vitesse à engrenages (difficiles à insonoriser et à synchroniser), corps de marche arrière, etc. La machine à pistons conserve sa valeur sur les bateaux très manœuvriers, tels que les remorqueurs, voire, dans l'industrie lourde, pour certains engins tels que les grands bloomings à renversement de marche, qui tendent toutefois à disparaître devant les installations électriques à volant d'inertie.



**Maquette
du bateau à vapeur du
marquis de Jouffroy d'Abbans**



Le « Great Western », premier navire à vapeur transatlantique régulier

Cette chimère: le moteur électrique !

Dès la découverte fortuite des effets dynamiques du courant par les élèves d'Ørstedt, en 1819, et les vastes travaux d'Ampère, les inventeurs s'étaient préoccupés de mettre en œuvre cette « force » nouvelle. Ils n'allaient pas tarder à s'apercevoir que le problème n'était pas simple; et l'on peut dire que durant cinquante ans, de 1820 à 1870, on admit, au nom du bon sens technique, que le moteur électrique était irréalisable.

« L'électricité est-elle en état de remplacer la vapeur comme force motrice ? Le moteur électromagnétique pourra-t-il un jour se substituer à la machine à vapeur ? On s'est quelque temps flatté de cet espoir, mais l'expérience et la théorie sont venues le renverser. Écarter les inventeurs et les praticiens d'une entreprise chimérique, c'est souvent leur rendre un signalé service... »

Qui parle ainsi ? Louis Figuier, dans son excellent recueil des « Merveilles de la science », paru en 1868 chez Furne-Jouvet. La démonstration, péremptoire et judicieuse, mérite d'être citée. Dans un moteur électrique, dit Figuier, la force motrice résulte des attractions entre les noyaux des électroaimants et les pièces mobiles. Le fonctionnement est satisfaisant dans un petit modèle; mais, dès que vous amplifiez les dimensions de la machine, les attractions diminuent de façon désastreuse avec la distance... Au fond, l'attraction électromagnétique est presque une force de contact et aucun effet utile ne peut être obtenu de ces va-et-vient de minime amplitude.

L'Exposition universelle de 1867, où furent présentées d'innombrables machines dans tous les domaines, avait consacré, en effet, cette définitive déconfiture du moteur électrique. Jules Verne, écrivant à la même époque « Vingt mille lieues sous les mers », nous explique avec complaisance toutes les structures nautiques et mécaniques du Nautilus...; excepté le moteur électrique de propulsion qui demeure tabou, même pour ce grand visionnaire.

Comment expliquer cet interdit si fortement motivé, cet échec d'un demi-siècle ? Tout simplement par une idée fausse : tout comme Papin fasciné par le vide, les inventeurs avaient uniquement songé, pour leur action motrice, aux électroaimants.

Découvert en 1820 par Arago et Ampère, l'électroaimant présente, en effet, des... séductions électromécaniques bien grandes. C'est un aimant qui se désaimante à volonté : quoi de plus tentant que de le faire agir sur des pièces mobiles, tout comme la vapeur agit sur un piston, voire l'eau sur une roue à aubes ?

La solution était perfide, car elle donnait, à petite échelle, des résultats appréciables. Dès 1839, grâce à une subvention personnelle du tsar Nicolas, Jacobi put équiper un bateau électrique. Le moteur Jacobi, fortement construit, comportait un disque mobile hérissé d'électroaimants parallèles, fixés comme les barreaux d'une cage d'écureuil ; en face, et presque à les toucher, se trouvait une couronne d'électroaimants fixes. En envoyant, par l'intermédiaire d'un commutateur tournant, un courant électrique dans cette double couronne, on obtenait un effort moteur relativement considérable.

Le bateau de Jacobi put naviguer sur la Néva contre le vent et à contre-courant, développant une puissance évaluée à 3 ou 4 ch. Les émanations de l'énorme pile de Grove qui alimentait le moteur furent telles qu'elles incommodèrent non seulement les passagers, mais jusqu'aux spectateurs situés sur la berge ! L'essai fut jugé peu satisfaisant et n'eut pas de suite.

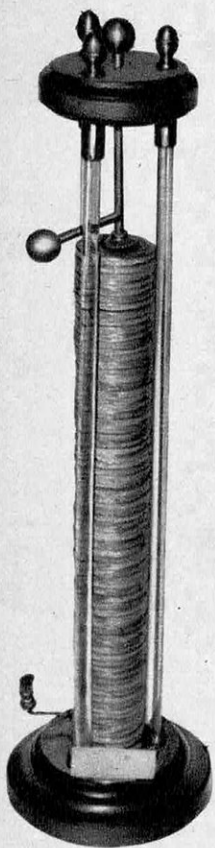
Patterson présenta en 1840 un modèle extrêmement simple : le moteur à palettes, encore usité aujourd'hui comme jouet et pour des expériences (tourne-tubes). Imaginez une roue sur la périphérie de laquelle on a fixé, à intervalles réguliers, des palettes de fer doux, comme les barreaux d'une cage d'écureuil. Par le mouvement de la roue, ces palettes viennent se présenter successivement devant les noyaux d'un électroaimant fixe, que l'on alimente par l'intermédiaire d'un distributeur en étoile, monté sur l'arbre. Il suffit que le courant soit établi dans les bobines au moment où une palette s'approche des noyaux attractifs et, au contraire, coupé dès que la palette les dépasse, pour que le mouvement soit entretenu.

N'en déplaise à Figuiér, un tel dispositif offre déjà des possibilités pratiques ; en 1842, un certain Davidson, en Écosse, n'hésita pas à en équiper une locomotive à roues de 1 m, qui put remorquer une charge de 8 t... on ne nous dit pas à quelle allure. Le grand industriel Froment, pour l'entraînement de ses machines à diviser, construisit un moteur à palettes montées en hélice en vue de régulariser le couple moteur ; haut de 2 m, ce moteur développait 1 ch et crachait du feu au commutateur. Il exécuta néanmoins un bon service.

Avec la disposition spirale, le moteur à palettes fait moins de feu au distributeur qu'un moteur à simple couronne, il possède un bon couple de démarrage et fournit un effort régulier ... tout ceci à l'échelle, si l'on peut dire, de la palette, c'est-à-dire sans aucune comparaison de puissance et de rendement avec les moteurs actuels.

On peut en dire autant d'engins passablement étranges, tels que le moteur à balancier et pistons plongeurs électromagnétiques (conçu également par Froment) qui semble une version électrique de la machine de Watt !

En tout état de cause, le prix très élevé de l'électricité, que l'on ne savait produire que par la corrosion du zinc dans les piles, aurait suffi pour mettre obstacle au développement de la puissance motrice électrique, même si l'on avait possédé d'excellents moteurs.



La pile de Volta



Le Palais de l'Electricité à l'Exposition Universelle de 1900

Les incompréhensions d'Edison

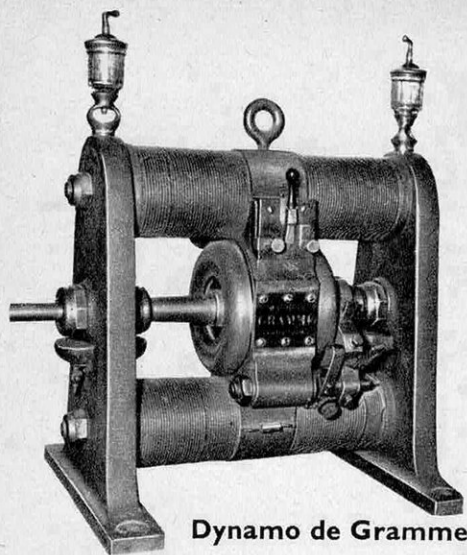
Qui allait lever brusquement ce double interdit ?

Un simple ouvrier belge, menuisier spécialisé dans les rampes d'escalier : Zénobe Gramme, un nom qui eût mérité l'immortalité linguistique, comme ceux de Volta ou d'Ampère, si la Convention, trois quarts de siècle plus tôt, n'avait pas donné précisément ce nom à l'unité de poids... Fâcheuse disgrâce pour un inventeur !

Gramme n'aimait pas les piles, qu'il trouvait malpropres. Visitant un jour les ateliers de galvanisation de Christoffle, il fut frappé de l'aspect vert-de-grisé des piles qui fournissaient le courant :

« Ne pourriez-vous faire votre électricité proprement », dit-il aux ouvriers.

A vrai dire, on faisait déjà de l'électricité « proprement » à l'époque. Gramme avait eu l'occasion de voir tourner, au Havre, la fameuse « machine de l'Alliance », qui alimentait le phare à arc de la Hève. Pixii, Clarke, Siemens avaient construit des génératrices à bobines tournantes et aimants fixes — ou réciproquement — engendrant un courant alternatif, que l'on pouvait aisément redresser à l'aide d'un commutateur tournant. Wilde



Dynamo de Gramme

avait même utilisé, au lieu d'aimants, un inducteur bobiné. Mais toutes ces machines étaient « à pôles saillants »; plus exactement, elles ne se trouvaient pas exemptes de la critique de Figuiet sur l'écartement prohibitif des pièces actives.

Gramme eut une idée de rampiste. Il bobina du fil isolé non plus sur un noyau rectiligne, mais sur un énorme anneau en fer doux, un tore; ainsi naquit l'« anneau Gramme » qu'il fit tourner entre les mâchoires d'un puissant aimant. De légers balais, frottant soit sur une partie dénudée du bobinage pour les faibles puissances, soit mieux sur un « collecteur » à lames, permirent de recueillir le courant produit par induction. Rendons justice, au passage, à un précurseur italien, l'étudiant Paccinotti, qui avait construit un modèle presque identique vers 1860; une copie de l'anneau Paccinotti existe au Conservatoire des Arts et Métiers.

Qu'y avait-il de nouveau et de révolutionnaire dans la machine de Gramme? Le mouvement transverse du courant mobile par rapport aux pôles de l'inducteur et, par suite, la possibilité d'avoir un « entrefer » de petite largeur, indépendant des dimensions de la machine. Telle fut la « dynamo » de Gramme, qui résolvait parfaitement ... le second problème : produire de l'électricité proprement et à bon compte.

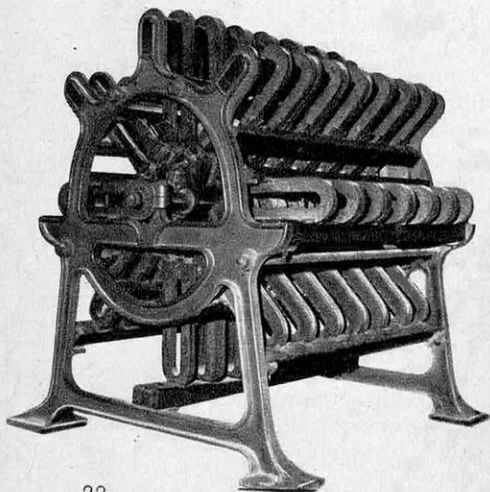
Quant au premier problème, celui d'un bon moteur électrique, il était résolu du même coup sans que personne (heureuse époque d'empirisme technique !) s'en avisât.

Ce fut seulement en 1873, à l'Exposition de Vienne, que l'ingénieur Hippolyte Fontaine s'aperçut, par un miraculeux hasard, de la « réversibilité » de la dynamo. Une machine de Gramme avait été installée pour fournir du courant à différentes applications d'éclairage, tandis qu'une seconde machine était gardée en réserve comme secours. Par suite de l'erreur d'un ouvrier, les deux machines restèrent branchées simultanément; si bien que quand le moteur à vapeur commença de faire tourner la machine numéro un, les ouvriers coururent chercher Fontaine pour lui faire constater que la seconde tournait également... Tel fut le premier « transport de force », ancêtre de tous nos réseaux actuels d'énergie.

Les distributions d'électricité à longue distance ne devinrent possibles que par un retour au courant alternatif, qui change aisément de tension; ce fut l'œuvre de Marcel Deprez, de Ferraris et, plus près de nous, de M. Darrieus. Thury avait néanmoins installé, entre Moulins et Lyon, une ligne de transport en courant continu à intensité constante, à l'inverse des réseaux actuels où c'est la tension qui demeure constante. Tous les interrupteurs fonctionnaient « à l'envers »; pour éteindre une lampe, on la mettait en court-circuit !

La découverte des *champs tournants*, par l'Austro-serbe Nikola Tesla, apporta un nouveau type de moteurs dénués de collecteur et même, pour les moteurs « à cage d'écureuil », de tout contact glissant. Edison, qui avait monopolisé, en Amérique, la production du courant continu, ne comprit rien à cette révolution. A partir de 1896, date de l'équipement des chutes du Niagara, il perdit totalement son monopole; la *Tesla Electric Company*, ou plus exactement le courant alternatif triphasé, va conquérir le monde. On peut être un bricoleur de génie, inventer le phonographe à feuille d'étain, la lampe à filament de bambou du Japon, et ne rien comprendre à la composition des grandeurs sinusoïdales, mère des champs tournants.

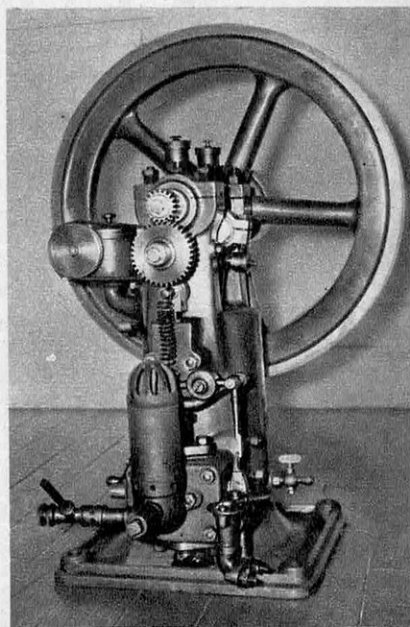
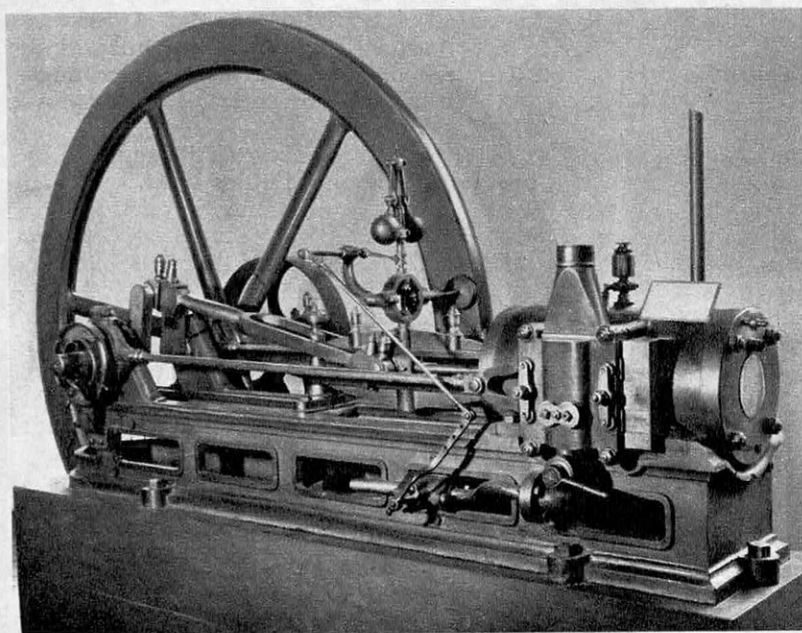
La machine de l'Alliance



Le foyer dans le cylindre

Depuis longtemps, les techniciens avaient tenté d'introduire le foyer des machines thermiques à l'intérieur du cylindre moteur. C'était de bonne guerre. Pourquoi une chaudière extérieure, encombrante et dangereuse, pourquoi toutes ces pertes de chaleur ? De bons moteurs à air chaud fonctionnaient, tout au moins pour les petites besognes, telles que faire tourner les grilloirs à café chez les épiciers. Au lieu d'échauffer l'air à travers une paroi métallique, par simple conduction, il était — théoriquement — rationnel d'engendrer la chaleur sur place, au ras du piston !

Le lecteur croira peut-être difficilement que l'on ait pu combiner ainsi en une seule capacité un foyer à charbon et un cylindre moteur. La machine fonctionna, mais on se doute du piteux état du cylindre, rayé par les cendres et les escarbilles, au bout de quelques heures de marche !

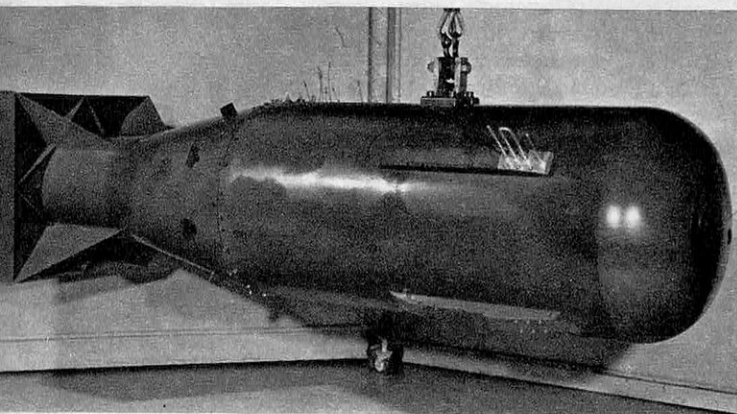


Le moteur à gaz de Lenoir et le premier moteur à explosion d'Otto

L'idée était juste, mais il fallait un combustible « propre », autrement dit un liquide ou un gaz. Telle fut la grande idée de Lenoir, puis d'Otto, pères du moteur à gaz. Dès les débuts, on proposa l'emploi du nouveau moteur pour la traction routière, l'aviation, la traction ferroviaire, avec fragmentation de la puissance sous différents véhicules automoteurs, toutes réalisations qui ne virent le jour que grâce à la substitution de l'air carburé par un combustible liquide au gaz d'éclairage, utilisé par Lenoir.

Est-il besoin de rappeler que l'épopée de l'automobile date de Daimler et du marquis de Dion ? Des dispositifs d'allumage extravagants, à cupules de platine chauffées, etc. furent employés dans les débuts ; tandis que les moteurs fixes utilisaient le transport de flamme par tiroir et veilleuse ou la bougie à basse tension oscillante Bollinckz. Le carburateur à prélèvement volumétrique d'essence (gicleur), aujourd'hui d'un emploi universel, fut précédé par des carburateurs à « léchage », où le moteur puisait de la vapeur d'essence au ras de la surface du carburant. Ici encore, il semble que l'on n'ait pu penser directement aux solutions simples.

De la chaleur des mers à l'atome



« Little boy », la bombe d'Hiroshima

Restent les formes actuelles de l'énergie, dont l'histoire se confond presque avec l'anecdote contemporaine.

Rudolf Diesel, inventeur du moteur à injection, s'est-il noyé fortuitement en mer du Nord... ou a-t-il été exécuté par des puissances d'argent que gênait son invention ? Le gigantesque tube de Matanzas, à Cuba, par lequel Georges Claude puisait l'eau froide nécessaire au fonctionnement de sa turbine maréthermique, a-t-il été saboté ? Par quel mystère politico-économique les Américains ont-ils abandonné le chantier de la formidable usine marémotrice de la baie de Fundy après y avoir employé 5 000 ouvriers ?

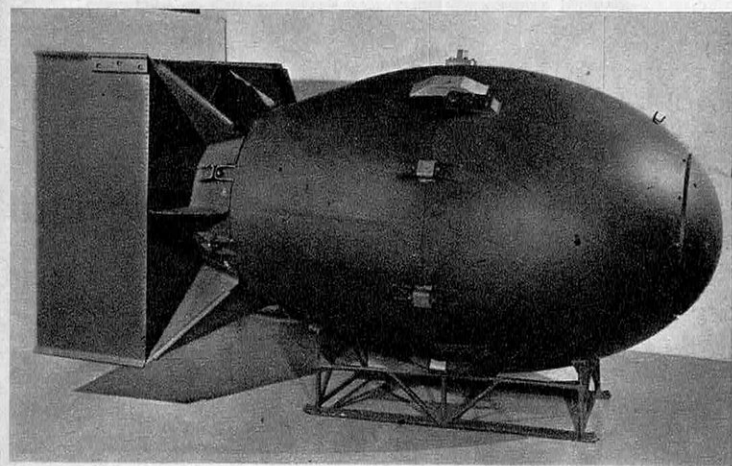
On conviendra que ce sont là des détails mineurs de l'histoire de la science, sans rapport avec la progression émouvante des idées.

Faut-il en dire autant de l'énergie atomique ? Ici encore, quel mouvement d'idées, généralement désintéressées et dont l'utilisation pratique n'apparaîtra que plus tard ; parfois aussi, quelles erreurs théoriques venant freiner les progrès !

De ces erreurs, une des plus célèbres, est celle de Fermi concernant la fission de l'atome d'uranium. C'était avant la dernière guerre. L'idée de rompre les gros noyaux, tels que celui de l'uranium, était dans l'air ; on avait obtenu, grâce aux accélérateurs, des ruptures individuelles, mais le grand Fermi, lui-même, n'avait pas aperçu la portée du phénomène ; il pensait que l'on obtenait des éléments plus lourds encore que l'uranium, des « transuraniens ». L'idée était vraisemblable, puisque l'on augmentait la masse du noyau de celle d'un projectile.

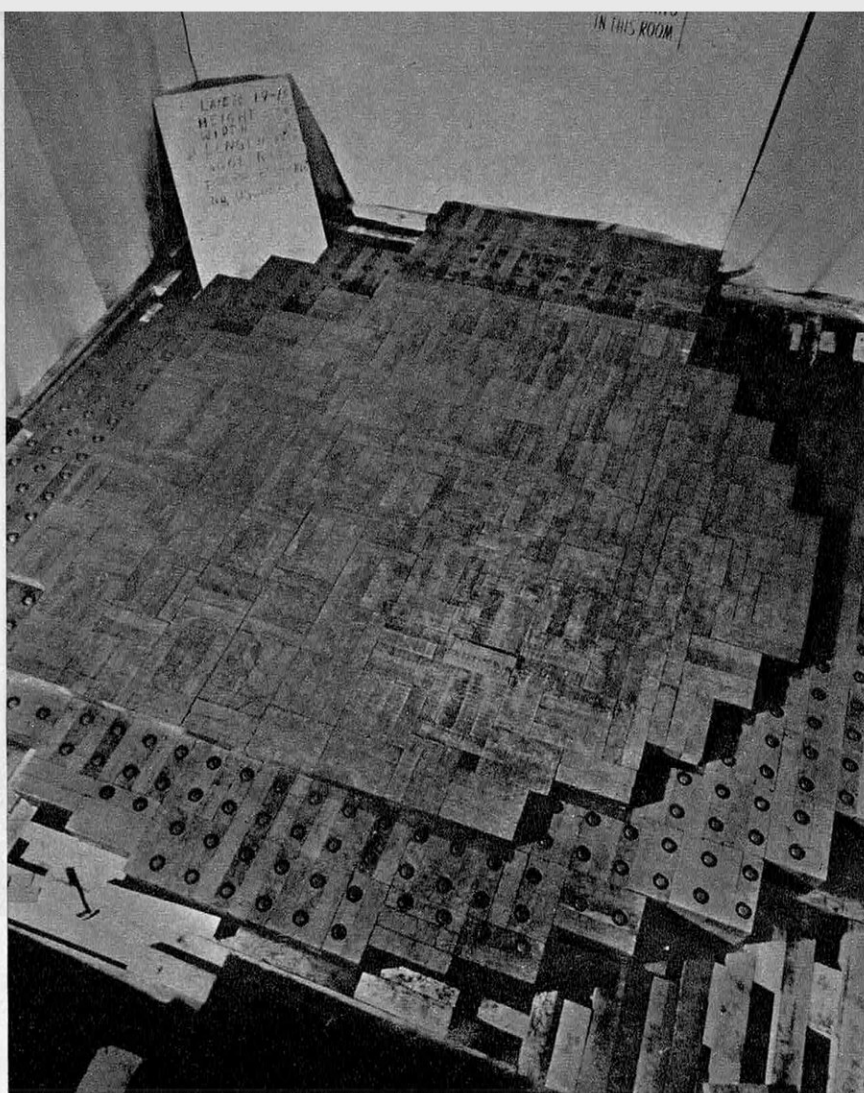
Les transuraniens, assurément, existent et nous avons réussi aujourd'hui à en produire un certain nombre. Mais, dans le cas en question, la réalité était autre : presque aussitôt après s'être incorporé le projectile, le noyau d'uranium, devenu instable, se scindait en deux noyaux de poids moyen, avec dégagement d'énergie.

C'est la *fission*, aujourd'hui classique, tant pour son emploi dans les réacteurs nucléaires que dans la « bombe A ». Mais, au seuil des années quarante, bien des physiciens s'engagèrent sur une fausse voie, laissant aux Américains et aux Anglais le privilège de faire aboutir les recherches. Il ne faut pas le regretter. Quel n'aurait pas été le visage atroce de la guerre de 1939-1945 si les combattants avaient disposé, dans les deux camps, de la bombe d'Hiroshima ? Nous avons connu depuis la « bombe H », première application de ces réactions thermonucléaires qui doivent nous ouvrir des perspectives illimitées sur la durée des sources d'énergie. La fission n'est pas encore



« Fat Man », la bombe de Nagasaki

La première
pile nucléaire
édifiée
à l'Université
de Chicago
en 1942

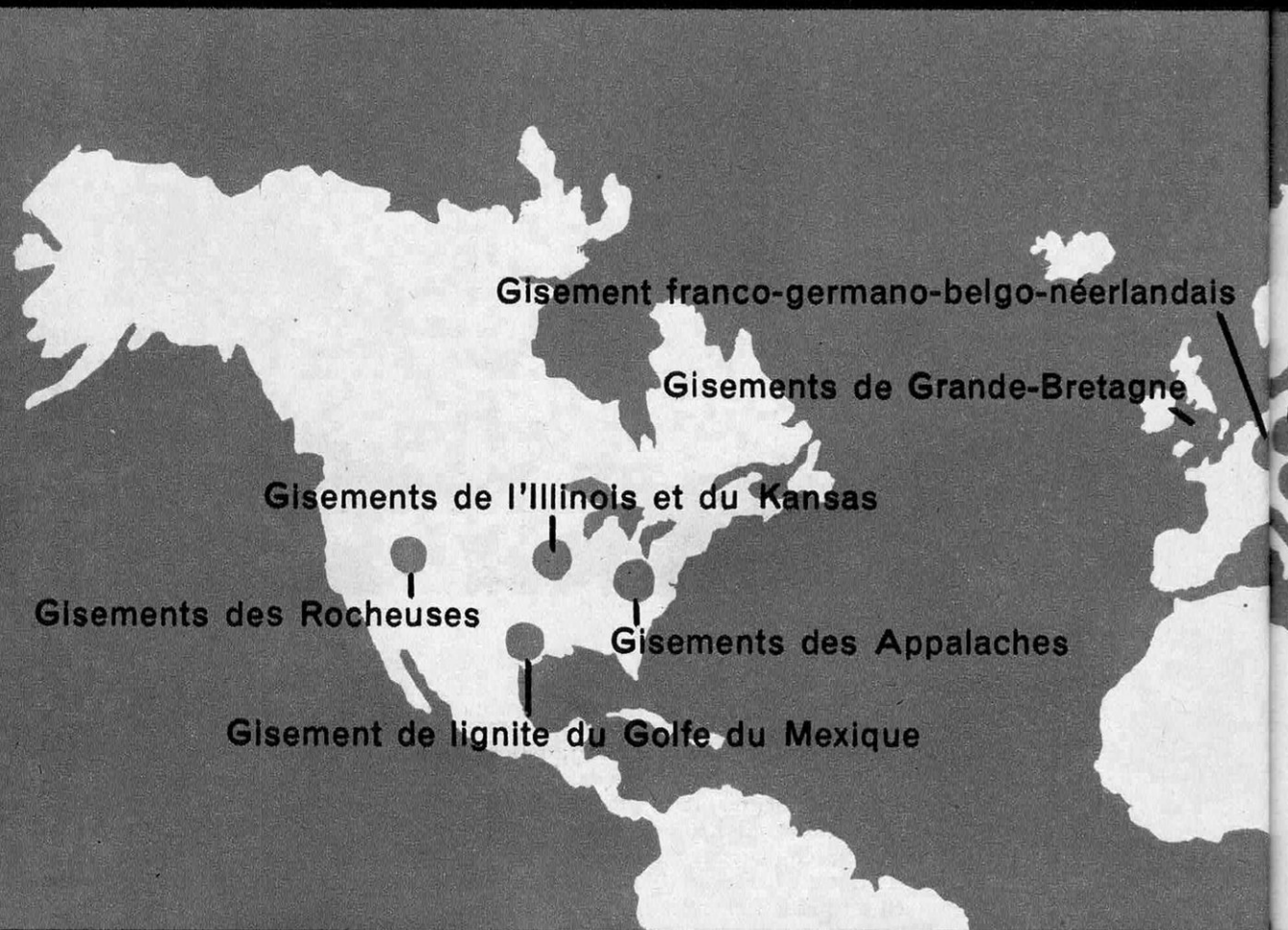


industriellement au point quant à son emploi dans les pacifiques centrales nucléaires que l'on hésite à multiplier actuellement, que les chercheurs rivalisent dans leurs tentatives de réaliser, à des températures de dizaines de millions de degrés, la condensation des isotopes de l'hydrogène, deutérium et tritium, en hélium. Les résultats des expériences entreprises aux États-Unis, en Russie, en Angleterre, en France, sont encore discutés, mais le but est fixé et les moyens mis en œuvre. L'appareillage est loin de son aspect industriel, mais il préfigure l'avenir.

Dans vingt ans, dix ans peut-être, des découvertes nouvelles peuvent transformer profondément l'aspect du problème de l'énergie. Dès maintenant, l'explosion souterraine des bombes thermonucléaires pourrait creuser des rades sur des côtes déshéritées, rénover les gisements d'hydrocarbures en apparence épuisés, distiller les immenses réserves de schistes du globe, aménager des centrales géothermiques. Mais la fusion nucléaire promet, lorsqu'elle aura pu être contrôlée et domestiquée, de satisfaire les besoins en énergie de l'humanité tout entière, non plus pour des milliers, mais pour des millions d'années. Les océans avec leurs ressources infinies en eau lourde, vont devenir paradoxalement la source inépuisable où puiseront les générations futures.

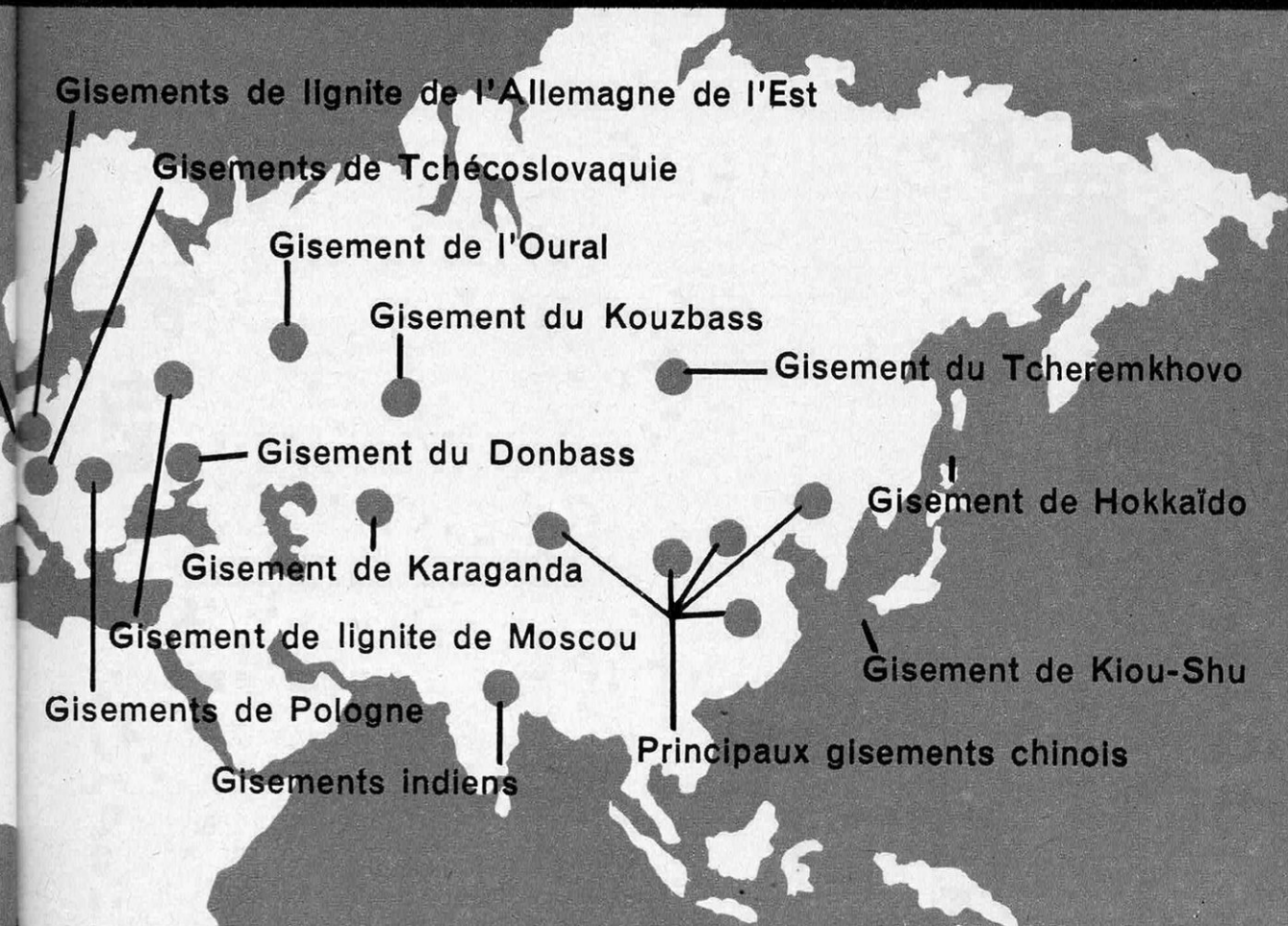
Pierre DEVAUX

le char



ON sait que le charbon est dû à une transformation lente de végétaux passant successivement à l'état de tourbe, de lignite, de houille et d'anhracite, le stade ultime étant le graphite. Cette transformation a eu lieu à toutes les périodes géologiques. On connaît des char-

bon



bons de l'ère primaire (il y a 225 à 600 millions d'années), de l'ère secondaire (il y a 70 à 225 millions d'années) et de l'ère tertiaire (il y a 5 à 70 millions d'années). Néanmoins, c'est pendant une période située à 300 millions d'années environ, au cours de l'ère primaire, que la for-

mation du charbon a été la plus importante. C'est la raison pour laquelle cette période géologique, qui a duré près de 50 millions d'années, a été appelée « carbonifère ».

Les réserves des gisements de charbon sont évaluées d'après les renseignements fournis par les travaux de reconnaissance, les sondages et la structure géologique. On conçoit que les chiffres ainsi obtenus puissent varier entre des limites assez larges. Le tableau ci-dessous présente une estimation des réserves de houille et de lignite des principaux pays producteurs, situées à une profondeur inférieure à 1 200 m.

Les principales zones où se trouvent les formations de charbon sont l'Europe occidentale et centrale, le sud de la Russie, la Sibérie centrale et méridionale, la Chine septentrionale et centrale, l'Inde centrale et orientale, le Japon et les États-Unis.

Voici quelques brèves indications sur chacune de ces régions :

1^o En Europe occidentale et centrale, la Grande-Bretagne, le triangle franco-germano-belgo-néerlandais, l'Allemagne de l'Est (lignite), la Tchécoslovaquie et la Pologne, sont les principaux lieux de concentration des réserves.

2^o En U.R.S.S., les principaux bassins sont ceux du Donetz (le Donbass) s'étendant au nord de la mer Noire entre Kiev et Rostov, ceux de Kouznetsk (le Kouzbass) et de Tcheremkhovo en Sibérie centrale, celui de Karaganda en Kazakhie, enfin celui de Moscou et ceux de l'Oural qui exploitent principalement du lignite.

3^o En Chine, plus de 50 gisements de charbon sont en plein développement, surtout dans les parties septentrionale (bassins de Foushoun, de Kailan, du Chensi, du Chansi).

centrale (bassin du Kansou), orientale (bassin du Kiangsi), et occidentale (Sin Kiang).

4^o En Inde, les principaux bassins sont ceux de la Damodar (bassins de Raniganj et de Jharia) et ceux du nord-est du Deccan.

5^o Au Japon, le charbon se trouve surtout au sud (île de Kiou-Shu) et au nord (île Hokkaïdo).

6^o Aux États-Unis, les principaux bassins se trouvent au pied des Monts Appalaches, dans les bassins centraux de l'Illinois et du Kansas, le long des Montagnes Rocheuses et en bordure du golfe du Mexique (lignite).

En Europe occidentale, le charbon, après avoir été pratiquement la source d'énergie dominante, voit sa suprématie fortement concurrencée par les hydrocarbures. La production ne suit plus l'expansion industrielle mais marque un palier. Dans les pays de l'Est, dont l'industrialisation a été plus tardive, la production de charbon croît encore mais commence à donner des signes de ralentissement.

La Chine, pauvre en hydrocarbures, verra sans doute le charbon continuer son ascension au cours des années prochaines, car elle peut doubler sa production actuelle.

En Inde, les gisements commencent à être mis en valeur.

Aux États-Unis la production annuelle, qui a dépassé 620 millions de tonnes en 1947, se stabilise aux environs de 350 millions de tonnes par suite de la concurrence toujours plus forte des hydrocarbures.

Mise en valeur d'un gisement

Lorsque les géologues ont précisé les contours et les caractéristiques d'ensemble du dépôt houiller, il faut ouvrir ce gisement, c'est-à-dire créer des accès jusqu'aux couches de charbon pour permettre non seulement le déplacement des hommes, mais aussi le passage des machines et des matériaux nécessaires à l'exploitation. Pour que les hommes puissent respirer normalement, il faut en outre établir un circuit d'air assurant son renouvellement et l'évacuation de l'air vicié. Deux puits ou deux tunnels appelés « fendues » communiquant entre eux par un réseau plus ou moins complexe de galeries permettent à l'air d'entrer par le puits le plus profond (ou la fendue la plus profonde) et de sortir par l'autre après avoir passé par les divers chantiers du fond. Les puits et les fendues sont équipés de moyens mécaniques de montée du charbon abattu et de transport tant des matériaux ou des engins nécessaires

Réserves de charbon, en milliards de tonnes, jusqu'à 1200 m

	Houille	Lignite
Grande-Bretagne	55 à 100	—
C E C A	60 à 110	70 à 130
(dont France)	(5 à 8)	(1 à 2)
Allemagne de l'Est	—	30 à 50
Pologne	60 à 100	35 à 60
Tchécoslovaquie	3 à 5	7 à 10
U. R. S. S.	650 à 1000	500 à 800
Chine	500 à 900	200 à 500
Inde	50 à 80	1 à 2
Japon	7 à 10	—
Etats-Unis	800 à 1500	1000 à 1400

à l'exploitation que du personnel. Ils constituent, avec les galeries auxquelles ils aboutissent, ce qu'on appelle « l'ossature générale de la mine ».

Le plan horizontal dans lequel se trouvent les galeries d'ossature s'appelle un « étage » d'exploitation. La distance verticale entre deux étages successifs peut varier de 50 à 150 m suivant la pente moyenne du gisement. Les galeries d'ossature sont des ouvrages de longue durée prévus pour transporter, dans un sens ou dans l'autre, personnel, matériaux et machines et évacuer le charbon provenant des chantiers d'exploitation.

L'ensemble des opérations nécessaires pour extraire le charbon de son gisement, entre deux étages successifs, et l'amener jusqu'aux galeries d'ossature s'appelle une « méthode d'exploitation ».

L'exploitation d'une houillère

Une méthode d'exploitation comprend essentiellement deux phases :

a) L'abattage du charbon, consistant à arracher celui-ci aux roches qui l'emprisonnent et à prévenir éventuellement la chute de celles-ci;

b) Le transport, où le charbon abattu est évacué depuis le chantier jusqu'aux galeries de roulage d'ossature.

On conçoit que, suivant les conditions du gisement, ces deux phases aient reçu des solutions extrêmement variées et que l'ingéniosité des hommes se soit adaptée chaque fois aux conditions naturelles. Mentionnons simplement les principaux moyens utilisés pour répondre à ces deux aspects.

L'abattage s'est fait d'abord au pic, puis avec un engin pneumatique appelé marteau piqueur auxquels sont venus s'adjoindre l'explosif, l'air comprimé sous haute pression (500 à 700 hpz), l'eau sous pression (40 à 70 hpz); simultanément, on a utilisé des machines découpant plus ou moins le charbon : haveuses, soit simples, soit à plusieurs bras ou à tambours; abatteuses-chargeuses continues, abattant et ramassant le charbon abattu, « rabots » abattant le charbon par passes rasantes.

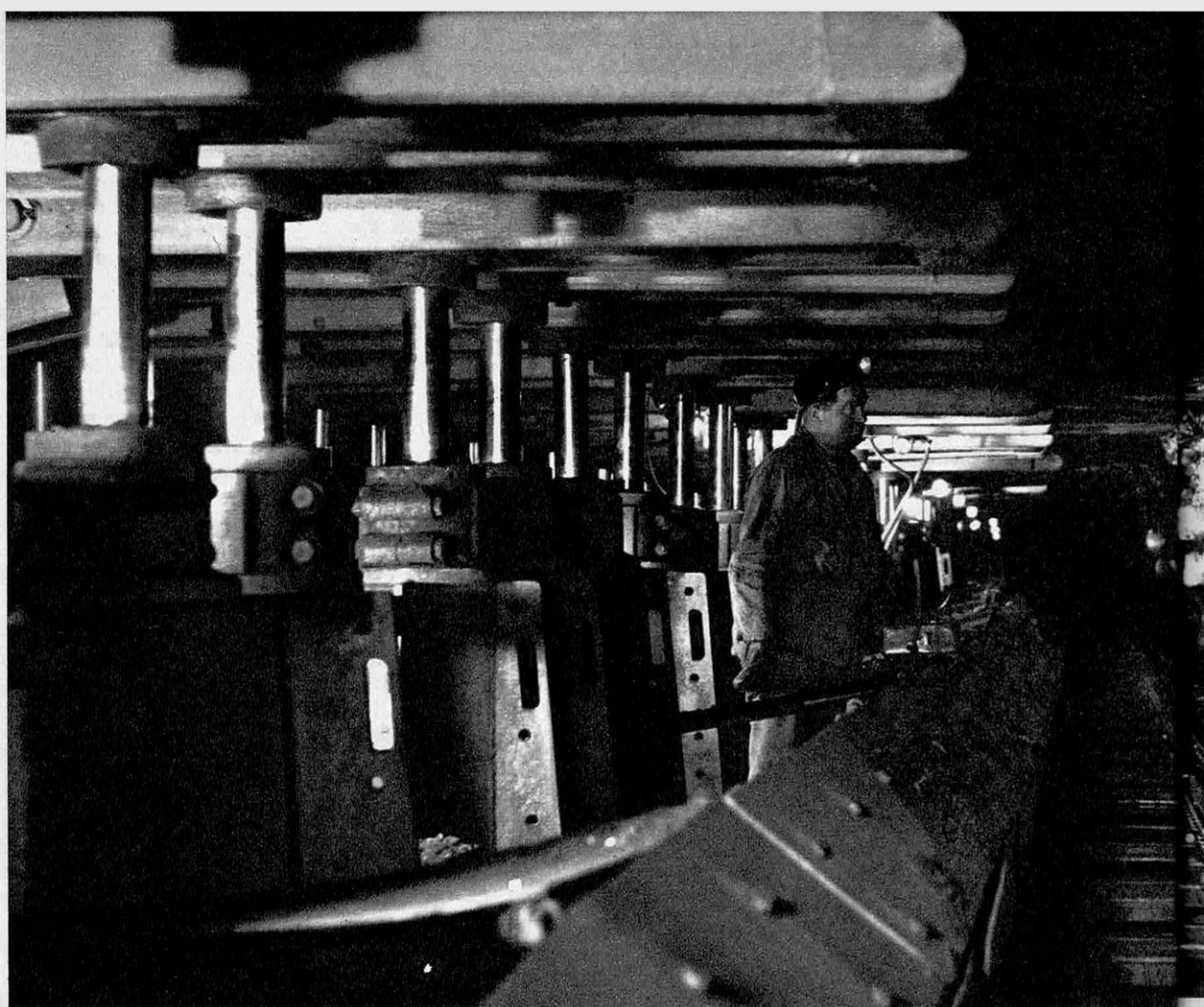
Il ne suffit pas d'arracher le charbon aux roches entre lesquelles il se trouve — roches où les mineurs distinguent le « toit » pour la roche supérieure et le « mur » pour la roche inférieure — il faut encore éviter que le toit ne s'éboule au chantier. Un tel éboulement, non seulement salirait le charbon en y incorporant des roches stériles non combustibles, mais encore présenterait le risque d'accident de personnes et de dommages pour le maté-

riel mécanique. C'est la raison pour laquelle, dans l'immense majorité des cas on pose dans le chantier, pendant l'abattage, un « soutènement », c'est-à-dire un ensemble de moyens destinés à éviter les mouvements brusques du toit. Il y a quelques années, on utilisait surtout des rondins de bois que l'on assemblait avec d'autres bois pour composer une espèce de quadrillage qui freinait la descente des terrains rocheux situés au-dessus du vide provoqué par l'extraction du charbon. Ensuite, on a remplacé ces bois, d'abord partiellement, puis totalement, par des « étançons » métalliques formés de deux pièces cylindriques pouvant coulisser lorsque la pression dépassait une certaine valeur. Puis ces étançons à friction eux-mêmes ont été remplacés par des étançons hydrauliques et dans certains cas par des « boulons » d'ancrage; ces boulons sont de longues tiges métalliques d'au moins un mètre de longueur, destinées à rendre solidaires les strates du toit en les empêchant de se décoller; on les enfonce dans un trou foré dans le toit, on ancre une extrémité au fond du trou et on visse sur l'autre un écrou qui prend appui contre le toit au moyen d'une plaque de serrage. Actuellement, des essais sont effectués avec un soutènement « marchant » hydraulique dont la pose, la dépose et le déplacement se font automatiquement.

Outre le soutènement, cette phase comprend aussi une opération annexe fort importante : « le traitement du toit », c'est-à-dire la manière dont on traite les vides de plus en plus grands laissés par le déhouillement; divers procédés sont employés : éboulements dirigés dans la partie inutile des vides créés (« foudroyage »), abandon de « piliers » de charbon servant d'amortisseurs à la pression des terrains, remplissage partiel ou total des vides (« remblayage »). Dans ce dernier cas, les matériaux de remblayage peuvent être ou bien disponibles sur place (rochers provenant du creusement des galeries), ou bien amenés à pied d'œuvre directement du jour. Ils sont mis en place au moyen de tuyauteries débitant dans l'espace à remblayer, soit hydrauliquement, soit pneumatiquement, soit mécaniquement.

Pour le transport, on trouve une variété tout aussi grande :

— Dans les chantiers, pour des débits pouvant aller de 5 à 100 tonnes/heure, on utilise des couloirs fixes en tôle lorsque la gravité peut être employée, ou des transporteurs à raclettes, ou des convoyeurs à courroie transporteuse, des scrapers (sortes de caisses qui raclent le charbon abattu), des chargeuses mécaniques, des camions-navettes.



Aux mines de Gardanne, un rabot abat le charbon qui tombe dans le convoyeur sou

— Dans les galeries, où les débits peuvent aller de 100 à 1 000 tonnes/heure, on se sert de trains de wagonnets (« berlines ») dont la capacité unitaire varie de 1,5 m³ à 12 m³ et qui sont mus par des locomotives électriques ou diesel dont la puissance varie de 25 à 300 ch. On utilise de même des courroies transporteuses ayant une largeur pouvant atteindre 1,2 m et se déplaçant à une vitesse de 2 à 4 m/s.

— Dans les puits, dont le débit doit être au moins égal à celui des diverses galeries qui y aboutissent, deux modes principaux d'extraction existent :

1^o Extraction par « cages », sortes d'ascenseurs à planchers multiples sur lesquels on place les berlines pour les faire monter au jour lorsqu'elles sont pleines ou pour les faire descendre lorsqu'elles sont vides.

2^o Extraction par « skips », sortes d'immenses paniers en tôle dont la capacité atteint

15 m³, dans lesquels on verse le charbon au fond. En arrivant au jour, le skip se vide automatiquement sur une courroie transporteuse à grand débit. Les skips permettent une marche entièrement automatique : c'est ainsi que le puits Freyming, en Lorraine, extrait journellement par skips 17 000 tonnes de charbon brut sans aucune intervention manuelle.

Cages et skips sont mus par des machines d'extraction électriques installées à la tête du puits et atteignant une puissance de 4 000 à 5 000 ch.

Principaux facteurs de l'exploitation

Ces divers moyens rapidement esquissés ne sont évidemment pas utilisés indifféremment; en fait, une méthode d'exploitation est précisément un choix, pour chaque phase et pour chaque opération de celle-ci, des



la protection d'un soutènement marchant

moyens les plus adaptés; ceux-ci dépendent d'une foule de facteurs dont nous énumérerons brièvement les principaux.

1^o Caractéristiques géologiques du gisement : présence de plis, de cassure, de failles, dus aux mouvements orogéniques postérieurs à la formation; épaisseur des « morts-terrains » (roches qui recouvrent la première couche exploitable), c'est-à-dire de la partie stérile du gisement; inclinaison (« pendage » en termes de mineur) des couches, épaisseur et régularité de celles-ci, présence d'eau dans les morts-terrains, densité du gisement (nombre de couches).

2^o Caractéristiques physiques du charbon : résistance, abrasivité, présence de grisou (méthane), de gaz carbonique, nature du charbon (maigre, cokéifiable, flambant, etc.), présence d'inclusions ou de nerfs stériles dans les couches, nature et propriétés mécaniques du toit et du mur, etc.

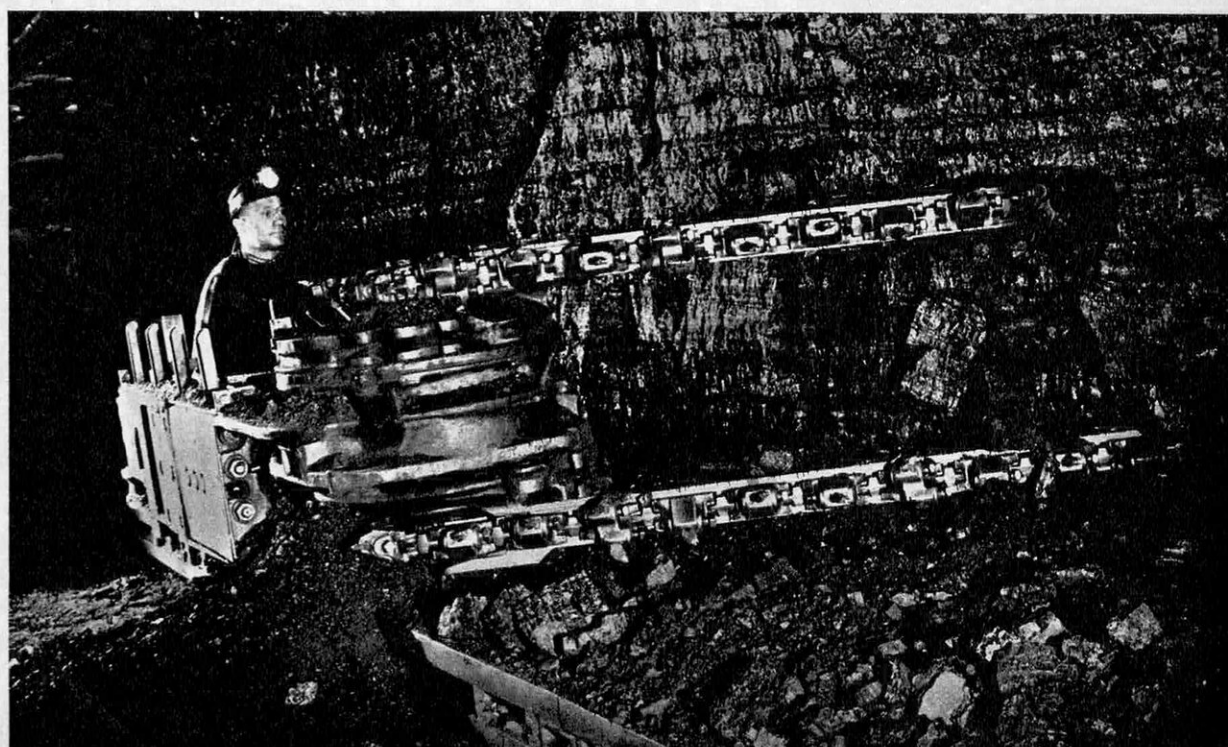
Les méthodes d'exploitation souterraines peuvent être classées en trois catégories :

1^o Les méthodes employées en gisement plat, en couches moyennes (de 1,5 à 4 m d'épaisseur) : c'est le domaine des « chambres et piliers » ou des tailles selon la profondeur et la nature des terrains.

2^o Les méthodes employées en gisement plus ou moins penté, en couches minces ou moyennes (de 0,5 m à 3 m environ d'épaisseur) : c'est le domaine des « longues tailles ».

3^o Les méthodes employées dans les couches puissantes, constituées d'une part par les amas de charbon dus à des mouvements

Aux mines de Carmaux, une haveuse en action pour l'abattage du charbon



géologiques particuliers, d'autre part par les couches pentées d'épaisseur supérieure à 3 ou 4 m suivant le pendage : c'est le domaine des « tranches » horizontales ou inclinées.

Il est impossible dans une courte étude de décrire les diverses méthodes employées ; nous nous contenterons de quelques exemples caractéristiques en précisant éventuellement certains points.

Chambres et piliers en gisement plat

La méthode d'exploitation par chambres et piliers est la méthode la plus répandue aux États-Unis dans les gisements souterrains de houille. Son utilisation exige une profondeur faible, généralement inférieure à 200 m, des couches régulières, pas trop épaisses (entre 1,5 et 4 m), un bon toit et un gisement peu penté, de pendage inférieur à 15 ou 20°. En France cette méthode n'est utilisée que dans un seul bassin, celui de Provence, où la nature exceptionnelle du toit et du mur a permis de l'utiliser à une profondeur de l'ordre de 500 m.

A partir d'une galerie d'entrée d'air, on creuse dans la couche, en principe entre toit et mur, des « traçages », c'est-à-dire des tunnels de section rectangulaire de 4 à 8 m de largeur sur une longueur pouvant aller jusqu'à 1 000 m. On les « recoupe » de la même façon, mais par attaques perpendiculaires au traçage initial. On laisse ainsi un quadrillage de piliers de charbon distants d'axe en axe de 10 à 25 m. Ces piliers sont abandonnés ou récupérés en fin d'exploitation.

Dans cette méthode, on utilise de grosses machines montées sur pneus ou sur chenilles ; d'abord une haveuse universelle fait une saignée de 10 cm d'épaisseur sur 3 m de profondeur dans le charbon. Ceci décomprime la couche dont une partie tombe à terre ; puis une « perforatrice » fore des trous de 2 à 3 m de profondeur dans le charbon resté en place au moyen de « fleurets » munis de « tail-lants » (c'est-à-dire au moyen de longues mèches dont l'extrémité coupante serait amovible). Quelques cartouches d'explosif y sont introduites puis mises à feu : c'est l'opération du tir qui termine l'abattage proprement dit. Une chargeuse sur chenilles ramasse alors le charbon abattu et le charge dans les camions-navettes qui le transportent au point de chargement en berlines où en courroie transporteuse. Aux endroits où la résistance du toit est douteuse, on pose des boulons d'ancrage pour éviter tout décollement.

Une telle méthode permet de produire en moyenne de 10 à 50 tonnes par ouvrier travaillant dans les chantiers (1).



Exploitation en longue taille dans les mines

Longues tailles

C'est la méthode la plus employée dans les charbonnages européens. Elle s'accommode (avec des résultats différents) de pentes allant de 0 à 25° et même 30°, de toits médiocres, de couches de 50 cm à plus de 2 m d'épaisseur, voire de failles pas trop importantes ni trop rapprochées.

Dans cette méthode, le chantier d'abattage est constitué par un front de charbon rectiligne, perpendiculaire à la stratification et

(1) On sait que la productivité dans les mines peut être indiquée par le « rendement fond » (c'est-à-dire par le tonnage moyen après élimination des pierres et lavage du charbon), par ouvrier présent au fond et par journée de travail. Ce chiffre est actuellement voisin de 2 tonnes en France. La différence entre ce chiffre et la production indiquée pour le chantier provient de ce que le rendement-fond fait intervenir non seulement le personnel occupé à l'abattage proprement dit, mais encore tous les ouvriers occupés aux transports, au remblayage, à l'entretien électro-mécanique, et aux autres « services généraux » du fond.



(Photo Son et Lumière)

de Carmaux. On distingue le front de taille, à droite, et le soutènement métallique

placé à peu près selon la ligne de plus grande pente. D'un côté de ce front se trouve le massif de charbon, de l'autre « la taille » c'est-à-dire l'espace vide utile (de 4 à 6 m de largeur, où se déplacent personnel et machines) et « l'arrière-taille » c'est-à-dire l'espace vide qui s'étend au delà.

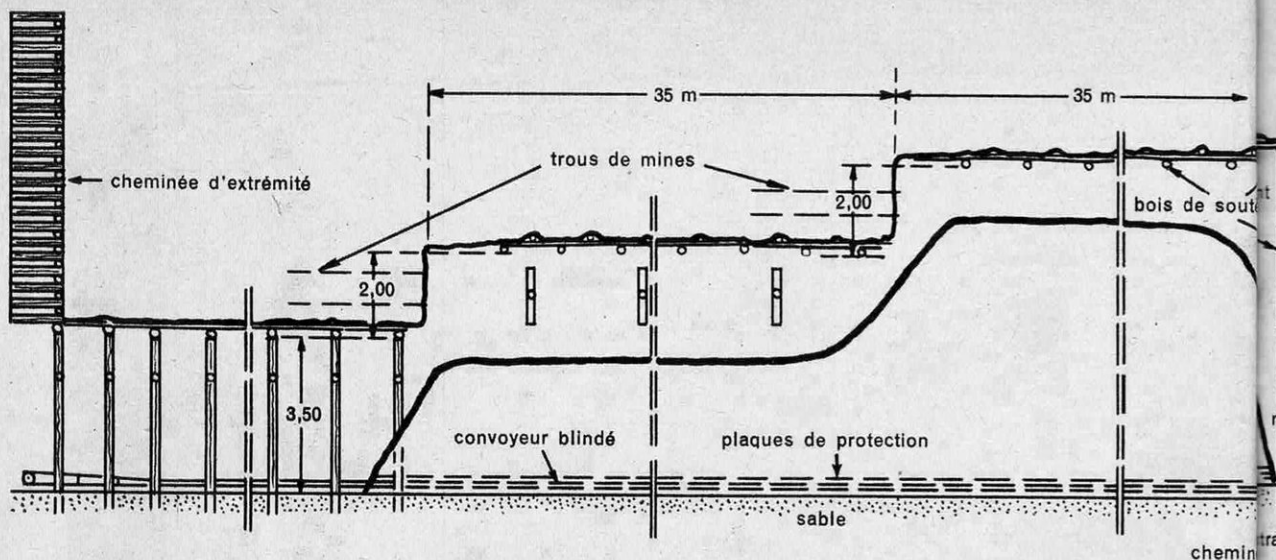
Le front de charbon est abattu chaque fois qu'il est possible par une machine d'abattage passant généralement au-dessus ou le long d'un engin d'évacuation du charbon. Le plus souvent la machine d'abattage est une haveuse à bras ou à tambours et l'engin d'évacuation un convoyeur à raclettes dit « blindé » pour indiquer qu'il est particulièrement robuste. La machine monte et descend le long du front en enlevant dans son mouvement de bas en haut, parfois dans les deux sens, le charbon abattu par passes succes-

sives de l'ordre de 10 à 80 cm en général.

Quand le charbon n'est pas trop dur, la haveuse est parfois remplacée par un rabot, espèce de soc métallique qui laboure le charbon et l'abat par petites écailles; quant au blindé, il peut être remplacé par un scraper, sorte de godet racleur qui charge le charbon au bas de la taille sur une courroie transporteuse.

Au fur et à mesure de l'abattage, on déplace le soutènement métallique composé d'étauçons et de « chapeaux » articulés. Dans les tailles les plus modernes, ce soutènement est marchant et se déplace automatiquement sous l'action d'une commande hydraulique.

L'arrière-taille est soit remblayée, soit foudroyée immédiatement derrière les étauçons, la taille étant protégée contre les éboulis



par des piles hydrauliques, sortes d'étauçons de renfort.

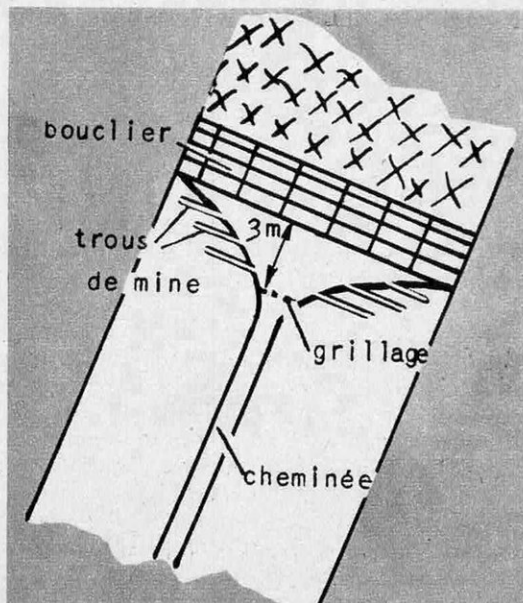
Un tel front de taille se déplace de 1,5 m à 4 m par jour et peut produire quotidiennement de 500 à 1 500 t et même 2 000 t dans certaines conditions favorables, sa longueur pouvant alors dépasser 200 m.

Méthodes d'exploitation de couches puissantes

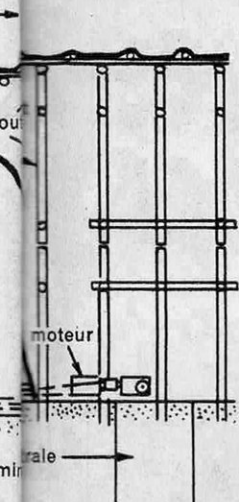
L'exploitation sous bouclier avec foudroyage est la méthode utilisée en U.R.S.S., dans le Kouzbass, pour les couches qui, par suite de mouvements géologiques, ont été redressées et atteignent un pendage élevé. Elle nécessite un pendage supérieur à 55° , des veines épaisses (entre 3 et 8 m d'épaisseur), à toit et mur réguliers, et une profondeur inférieure à 250 m. Dans cette méthode, le front de taille est horizontal; il s'abaisse régulièrement par passes de 50 cm à 1 m entre deux niveaux distants d'environ 100 m verticalement. La longueur de front est d'environ 25 m, sa largeur étant naturellement égale à la traversée horizontale de la couche entre toit et mur.

A environ 2 m au-dessus du front, un bouclier protège le personnel contre les éboulis du toit qui tombent sur lui. Ce bouclier, constitué de poutrelles en fer et de gros bois, a une épaisseur de 1 m de façon à supporter

ces charges. Sa descente s'effectue au fur et à mesure de l'abattage du charbon en faisant glisser chaque extrémité du bouclier contre le mur et contre le toit. L'abattage est fait à l'explosif après foration de trous dans les banquettes de charbon sur lesquelles repose le bouclier. Le charbon abattu s'évacue par des cheminées centrales creusées à l'avance dans la couche et aux pieds desquelles le charbon est chargé en berlines. Les cheminées voisines du front de taille servent à la circulation du personnel. Le toit se foudroie au fur et à mesure de la descente du bouclier. Un tel front permet d'obtenir une production journalière d'environ 150 t.



DANS LE KOUZBASS on exploite par front de taille horizontal, de haut en bas, les veines ayant un pendage supérieur à 55° . Le charbon tombe dans des cheminées centrales creusées au préalable, l'abattage s'effectuant à l'abri d'un bouclier coulissant entre toit et mur, de 1 mètre d'épaisseur.



DANS LE BASSIN DE LORRAINE, au siège de Merlebach, l'inclinaison des veines étant supérieure à 60°, on utilise un procédé d'exploitation avec remblayage hydraulique suivant le schéma ci-contre. Le charbon est abattu par explosif en deux gradins espacés de 35 m qui cheminent de droite à gauche. Le charbon tombe sur le sol et sur le convoyeur qui est protégé par des tôles avant d'être mis en route. La tranche terminée, on remblaie avec du sable amené hydrauliquement par la cheminée d'extrémité, l'eau s'évacuant par la cheminée centrale.

L'exploitation avec remblayage hydraulique est utilisée dans les dressants du siège de Merlebach (Bassin de Lorraine) pour des veines de 1 à 3 m d'épaisseur, à charbon dur, à toit bon ou moyen, à pendage supérieur à 60°.

En marche normale, le front de charbon comprend deux gradins de 2 m de hauteur décalés de 35 m l'un de l'autre. Chacun d'eux est abattu à l'explosif par passes de 3 m de longueur; le charbon du gradin inférieur tombe directement sur le sol. Celui-ci est constitué de sable de remblayage qui a été mis en place hydrauliquement à partir d'une cheminée d'extrémité à la fin de l'exploitation de la « tranche » de 4 m précédente (ensemble des deux gradins précédents). Sur ce sable repose un convoyeur blindé recouvert de tôles destinées à le protéger contre la chute des blocs de charbon provenant de l'abattage. Entre le sol et le charbon du gradin inférieur, un canal de 3 à 3,5 m de hauteur permet à l'air de passer. Cette hauteur a été calculée de manière à laisser entre la « couronne » du chantier — c'est-à-dire son plafond — et le tas de charbon résultant de l'abattage du gradin supérieur (qui tombe sur celui du gradin inférieur), un espace libre d'environ un mètre pour le passage de l'air et du personnel.

Quand le deuxième front est à son tour à 35 m de la cheminée centrale (le gradin inférieur est alors à 70 m de celle-ci), l'évacuation du charbon commence. On met en route le blindé et on enlève les plaques de tôle au fur et à mesure de la diminution du tas de charbon qui tombe par gravité dans la cheminée centrale. Des bois posés entre toit et mur assurent la sécurité du travail au chantier.

Lorsque la tranche est terminée, elle se présente comme un long tunnel dont la section serait un parallélogramme ayant 7,5 m de longueur de grand côté. Il ne reste plus qu'à remblayer en faisant arriver hydrauliquement du sable par les cheminées d'extrémité. L'eau est évacuée par la cheminée centrale et le sable retenu sur place. On remblaie jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un passage d'environ 3 à 3,5 m sous la couronne. La tranche est alors prête pour un nouveau déhouillement par gradins de 2 m dans le même sens que précédemment.

Un tel chantier permet d'atteindre une production de 80 à 150 t par jour.

Exploitation par découverte

Une découverte est une mine à ciel ouvert que l'on exploite à la manière d'une carrière lorsque la couche se trouve à faible profondeur (ne dépassant pas 50 à 100 m, selon la richesse du gisement). Une telle exploitation est utilisée surtout dans les gisements de lignite, en particulier en Allemagne et en U.R.S.S., mais se trouve aussi dans les gisements de houille, par exemple aux États-Unis, et en France à Decazeville.

Actuellement, l'organisation d'une découverte est la suivante : on déblaie les mort-terrains à l'aide de grands excavateurs à roue-pelle d'une puissance de 100 à 1 000 kW munie de 5 à 8 godets ayant chacun de 1 à 7 m³ de contenance. Ces déblais sont transportés par camions de grande capacité (de 20 à 50 t), par courroies transporteuses ou par trains de wagons ou encore par téléphériques et déversés sur des terrils ou dans des carrières abandonnées. Ensuite, la même roue-pelle enlève la couche de charbon, que l'un des moyens de transport précités emmène chez l'utilisateur, généralement une centrale thermique.

Une telle installation peut produire jusqu'à 20 000 t de charbon par jour et, malgré une quantité de terres enlevées pouvant être 5 fois plus grande que celle du charbon extrait, rivaliser avec les autres sources d'énergie au point de vue prix de revient.

En France, la découverte de Decazeville dans le bassin d'Aquitaine est équipée de grosses pelles à godet de 5 m³ chargeant sur des camions de 20 t. Des sondeuses puissantes forent les trous dans lesquels l'on peut concentrer l'explosif au moment du tir des terrains. Des bulldozers sont utilisés pour les travaux de terrassement. Cette exploitation déplace par jour, en marche normale, 6 000 à 7 000 m³ et produit en moyenne 700 t de charbon.



Une lutte physique et créatrice permanente

Ce rapide panorama mondial de l'industrie houillère et de quelques-unes de ses méthodes, fort incomplet certes, s'est efforcé de montrer au lecteur non spécialiste l'ingéniosité que des générations de mineurs ont déployée pour extraire cette ressource énergétique à qui est dû l'extraordinaire élan technique aux progrès duquel nous assistons actuellement. Au terme d'une étude où les difficultés réelles déjà vaincues ou à vaincre à nouveau chaque jour n'apparaissent qu'assez estompées, il est juste d'attirer l'attention sur le personnel des houillères dont la ténacité, le courage, souvent l'abnégation dans leur lutte permanente sous terre ont permis à l'ensemble des pays civilisés de parvenir au niveau culturel et technique où ils se trouvent.

Si le charbon est en butte présentement aux assauts de ses concurrents plus jeunes, la profession ne perd pas son enthousiasme ni son imagination créatrice et espère bien progresser longtemps encore et continuer à diminuer la peine des hommes tout en inventant des méthodes toujours plus efficaces et plus sûres, à des prix restant concurrentiels, pour fournir au monde une part de cette énergie qu'il consomme en quantités constamment croissantes.

Le marché du charbon

En France comme d'ailleurs dans le monde, le charbon n'assure plus que 60 % des besoins d'énergie.

Pour les générations passées qui ont vu l'invention de la machine à vapeur, la naissance du chemin de fer, les débuts de la distribution du gaz et les premières centrales électriques, le charbon était à l'origine de toutes ces merveilles et en permettait l'essor prodigieux.

Pour l'homme moderne, le charbon est seulement l'un des moyens dont il dispose pour créer énergie et chaleur; les cours d'eau domestiques, le pétrole, le gaz sont aptes à lui rendre les mêmes services dans de nombreux domaines.

← Exploitation par découverte

Cette exploitation à ciel ouvert, de Decazeville dans le bassin d'Aquitaine, est la seule de ce genre en France. Elle se fait à l'aide de grosses pelles à godet de 5 m³ et de camions de 20 t. En marche normale, elle effectue 7 000 m³ de terrassement et produit en moyenne 700 t de charbon par jour.

Le développement des autres sources d'énergie entraîne-t-il inexorablement la disparition du charbon ou du moins son déclin progressif? Cette question serait angoissante pour les houillères qui représentent un capital et un potentiel énormes et sont la base de vie d'une population considérable, si les besoins d'énergie dans le futur ne devaient pas être tels que toutes les sources disponibles devront sans nul doute être mobilisées pour y faire face.

Mais le coût de cette énergie doit, dans chaque cas d'espèce, être aussi réduit que possible et les houillères se trouvent finalement placées devant le dur problème de la concurrence : elles s'appliquent à le résoudre en améliorant sans cesse leur productivité, en renonçant à exploiter les mines dont le prix de revient est trop élevé, en valorisant chaque jour davantage leurs produits.

La sidérurgie, premier client des houillères

Cette valorisation consiste d'abord à orienter leur activité au maximum vers la satisfaction des besoins des secteurs où la consommation de leurs produits est irremplaçable. Le plus important de ces secteurs est celui de la sidérurgie dont les besoins en coke, malgré les progrès de la technique, vont et iront encore en augmentant durant de longues années.

Pour y répondre, les houillères poursuivent un gros effort d'investissement afin de porter leur possibilité de fabrication de coke de 7,3 millions de tonnes aujourd'hui à 9,5 millions de tonnes en 1965, ce qui représentera la distillation de près de 14 millions de tonnes.

Si l'on tient compte de la livraison simultanée aux usines sidérurgiques de charbons cokéfiants (2,5 millions de tonnes prévues en 1965) et de charbons maigres de plus en plus recherchés pour la préparation du minerai avant la charge du haut fourneau (1 million de tonnes prévues en 1965), dans un avenir proche, près du tiers de la production des houillères se trouvera assuré d'un placement garanti, aux aléas de conjoncture près.

Un avantage considérable en ce qui concerne la valorisation de la production se trouve attaché au développement de la cokéfaction : celui de la croissance parallèle de la carbochimie dont elle est le complément naturel. Cette partie de l'industrie houillère en pleine expansion tient sur le marché national une place primordiale. Ses usines fournissent plus de la moitié de la production

française d'engrais et des pourcentages allant de 20 à 80 % des produits de base issus du gaz, du benzol et des goudrons, résidus nobles de la distillation, d'où l'on tirera des fibres (crylor, tergal, nylon, rhovyl), des résines, des matières plastiques, etc.

Si la carbochimie n'est pas directement une consommatrice importante de charbon, du moins lui apporte-t-elle une aide financière appréciable et contribue-t-elle ainsi à rendre la houille compétitive dans les domaines où elle ne jouit plus d'un monopole de fait.

Les centrales thermiques

La préparation de produits nobles tels que ceux qui entrent dans les fours des cokeries s'effectue dans d'immenses lavoirs où schistes et houille sont séparés : il en ressort cependant des produits intermédiaires dits « mixtes », des produits fins dits « schlamms » dont les teneurs en stérile et en eau sont élevées : s'il est aujourd'hui possible de récupérer au maximum la houille contenue dans les schlamms, il n'en reste pas moins que 40 % d'impuretés solides seraient inutilisées si les techniques modernes ne permettaient d'utiliser de tels résidus, une fois pulvérisés, dans de grosses unités thermiques pour la production de l'électricité.

Les installations des houillères sont puissantes et représentent une capacité de production considérable : ainsi en 1959, bien qu'elles n'aient pas été de loin utilisées à pleine charge, elles ont assuré 14 % de l'énergie électrique totale de la France.

S'agissant d'approvisionner les centrales thermiques d'E. D. F., le problème se pose différemment : les houillères doivent garan-

tir un coût d'exploitation concurrentiel en plus de la sûreté d'approvisionnement pour laquelle elles donnent déjà la meilleure assurance : la calorie « charbon » rendue aux brûleurs des chaudières d'E.D.F. est actuellement plus économique que toute autre, sauf quelques cas excentriques sur les côtes, et comme les grandes agglomérations urbaines et industrielles consommatrices sont près des houillères, celles-ci ont une vocation naturelle à couvrir les besoins d'E.D.F.; aussi lui garantissent-elles une part chaque année plus forte de ses besoins : 4,7 millions de tonnes en 1960, 9 à 10 millions en 1965.

Le chauffage industriel

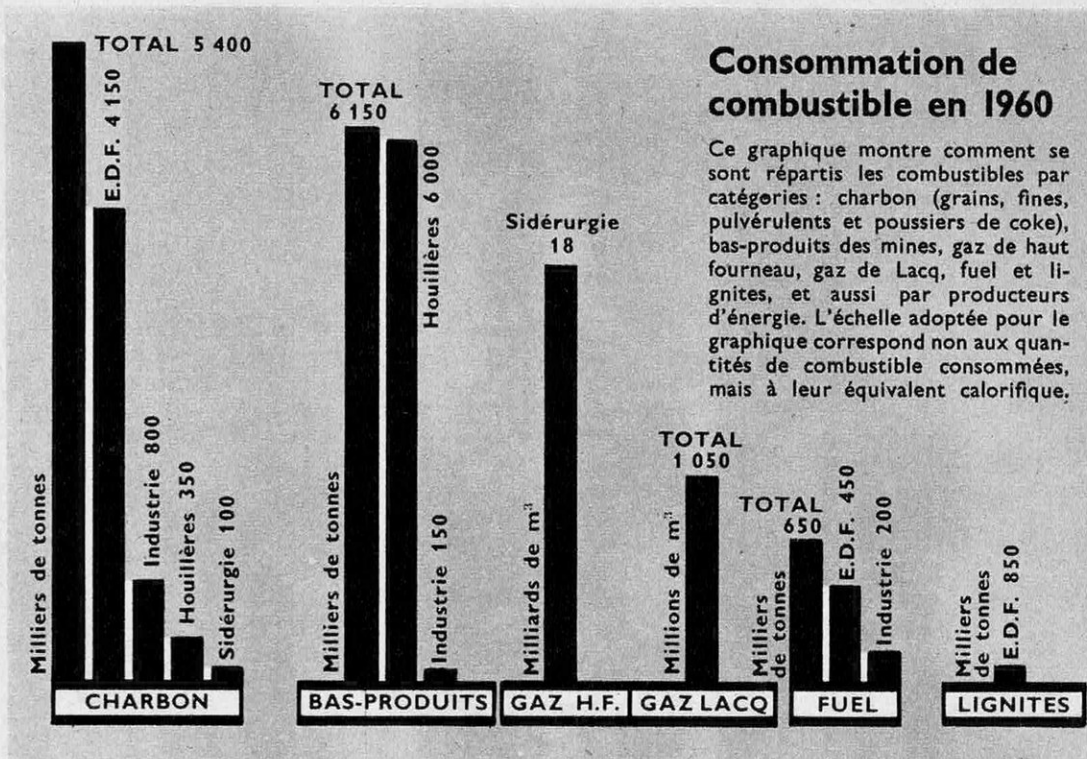
Après avoir satisfait leurs besoins intérieurs, ceux de leurs usines annexes, de carbochimie notamment, affecté 14 millions de tonnes à la cokéfaction, livré 10 millions de tonnes à E.D.F., 1 million de tonnes à Gaz de France qui dans cinq ou six ans distribuera essentiellement le gaz naturel de pétrole, les houillères doivent demain trouver encore l'écoulement d'une vingtaine de millions de tonnes, composées essentiellement de charbons inaptes à la cokéfaction et qui ne peuvent donc être utilisés que pour la production de vapeur, le chauffage de fours industriels ou le chauffage domestique.

Si l'on met à part 2 millions de tonnes qui seront encore fournis à la S.N.C.F. pour les dernières locomotives à vapeur, ces charbons doivent donc être à même de soutenir la comparaison avec leurs concurrents, le fuel principalement.

Dans l'industrie, la sûreté des fournitures et la facilité de stockage comptent, mais

Production annuelle de charbon (en millions de tonnes)

	Houille			Lignite		
	1957	1958	1959	1957	1958	1959
Grande-Bretagne	227	219	209	—	—	—
CECA	248	246	235	100	97	97
(dont France)	(57)	(58)	(58)	(2)	(2)	(2)
Allemagne orientale	3	3	3	213	215	214
Pologne	94	95	99	6	8	9
Tchécoslovaquie	24	26	27	51	57	54
U. R. S. S.	327	353	360	136	143	146
Chine	131	270	348	—	—	—
Inde	44	46	48	—	—	—
Japon	52	50	48	—	—	—
États-Unis	468	389	387	2	2	2



moins que le prix de revient de la calorie utile. Si dans les grandes centrales thermiques d'E. D. F., le charbon bénéficie aujourd'hui d'un avantage à cet égard, car dans des unités de 125 000 kW voire de 250 000 kW, la consommation considérable permet aisément d'amortir le supplément d'investissement inhérent au combustible solide et laisse encore une marge bénéficiaire à l'exploitation, il est bien évident que, dans des installations industrielles de moindre importance, où souvent la production d'énergie et les frais de chauffage ne représentent qu'une faible partie du prix de revient, le charbon est à priori moins bien protégé, et dans ce vaste domaine la lutte est rude.

Dans les années futures, si des positions doivent être abandonnées, par contre une part substantielle, de l'ordre de 7 à 9 millions de tonnes, devra être défendue pour assurer l'équilibre d'une production qui — après tous les assainissements possibles — est un tout en elle-même et représente pour la nation une sûreté à laquelle elle ne peut renoncer.

Le chauffage domestique

Le chauffage des foyers domestiques revêt des aspects multiples, depuis le poêle ou la cuisinière d'un foyer jusqu'à la chaudière

d'appartement, d'immeuble, ou la grosse centrale de chauffe d'un ensemble immobilier.

Là, et surtout chez le petit consommateur, la commodité prime parfois le coût, et c'est alors un handicap sérieux pour le charbon, ou plutôt c'était un handicap, car les efforts poursuivis depuis plusieurs années pour adapter l'utilisation du charbon à l'automatisme et à la propreté qu'exige le consommateur ont porté leurs fruits et ils sont poursuivis avec constance.

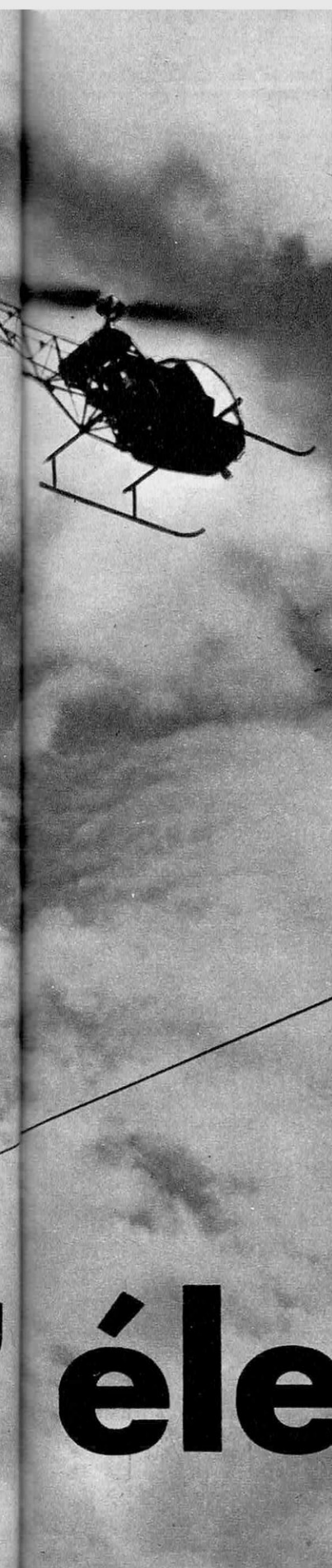
Mais lorsque l'utilisateur — et c'est tout de même encore souvent le cas — attache plus d'importance à l'économie, à la simplicité, à la sécurité de fonctionnement qu'à l'automatisme intégrale, le charbon reprend tous ses droits et le parc de chaudières classiques de chauffage central au charbon dépasse à l'heure actuelle le chiffre de 1 500 000.

Enfin, les installations de chauffage centralisé au charbon (chauffages d'îlots ou chauffages urbains) prennent à l'heure actuelle un développement considérable si bien qu'il paraît raisonnable de penser que le chauffage domestique absorbera encore pendant plusieurs années les quelque 10 millions de tonnes de charbon des bassins français nécessaires pour boucler le bilan que nous venons d'ébaucher à grands traits.



La ligne à
haute tension,
pièce maîtresse
du réseau

1,



IL paraît maintenant normal, en France, de n'avoir qu'à appuyer sur un bouton pour éclairer sa chambre ou son bureau et qu'à la tombée de la nuit les rues de nos villes s'éclairent automatiquement. L'électricité est tellement liée à la vie d'un pays moderne que les économistes se penchent sur l'indice de consommation d'électricité pour jauger rapidement l'activité économique, et que la consommation électrique par habitant est très fréquemment considérée comme un critère du niveau de vie ou du degré d'industrialisation.

L'électricité n'est pourtant pas une énergie de base. Elle est obtenue par transformation de l'énergie calorifique des combustibles fossiles (charbon, pétrole ou gaz), ou de l'énergie hydraulique; mais du fait de sa facilité d'emploi, l'augmentation de sa consommation est beaucoup plus rapide que celle des autres formes d'énergie.

Les premières centrales

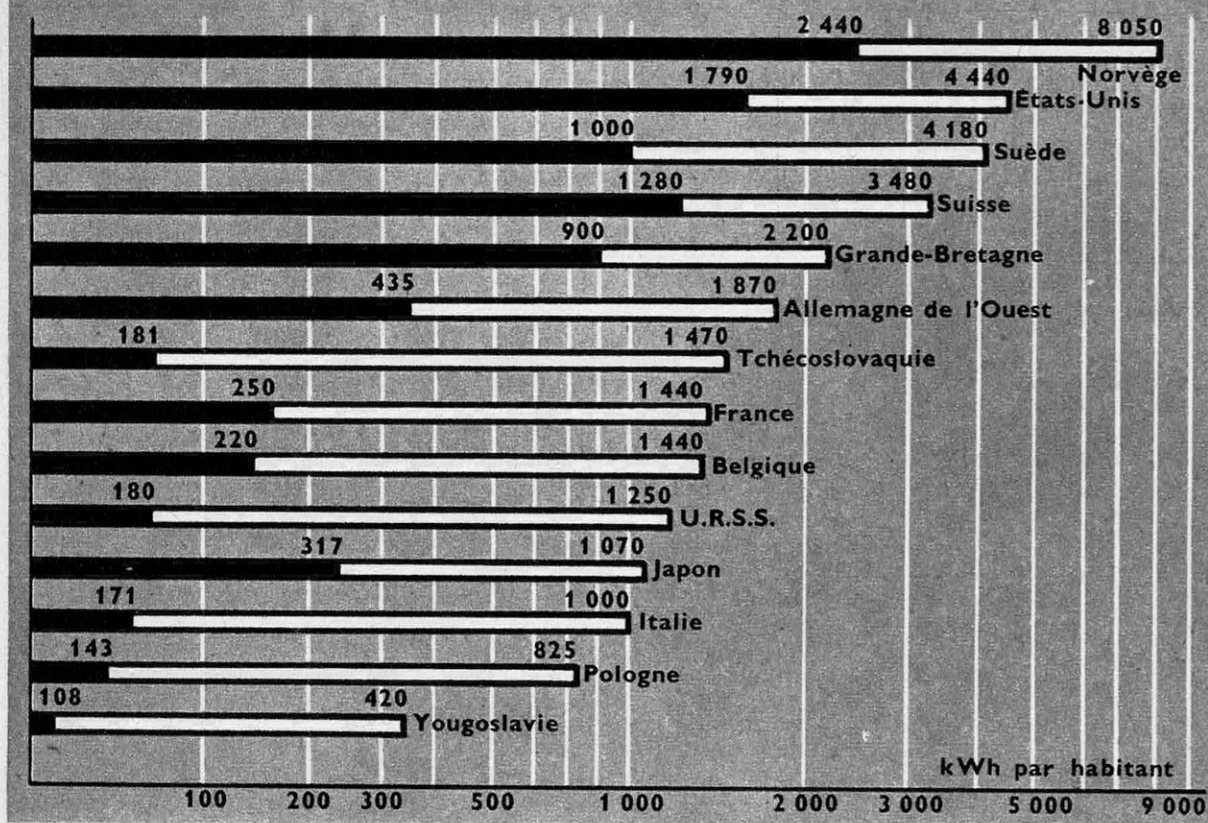
La distribution de l'électricité ne date que de la fin du siècle dernier. La centrale thermique de Holborn Viaduct à Londres, mise en service en janvier 1882, avait une puissance de 60 kW. A la fin de la même année, la centrale thermique Thomas Edison à New York pouvait fournir une puissance de 720 CV.

En France, la même année, M. Louis Dumont présentait la première demande de concession d'une usine hydroélectrique sur la Valserine, avec l'équipement de trois groupes d'une puissance totale de 800 CV, pour l'alimentation des villes de Bellegarde et Vanchy-Coupy; cette forme d'énergie se répandit très vite dans les villes des Alpes et, en 1888, La Roche-sur-Foron était qualifiée de « première ville-lumière d'Europe ».

A Paris, 4 usines de 20 CV assuraient l'éclairage de la place du Théâtre Français, de la place et de

SUITE PAGE 44

électricité



Production d'énergie électrique (en milliards de kWh)

ANNÉES	GDE-BRETAGNE			FRANCE			SUISSE			ÉTATS-UNIS			U.R.S.S.		
	Therm.	Hydr.	Total	Therm.	Hydr.	Total	Therm.	Hydr.	Total	Therm.	Hydr.	Total	Therm.	Hydr.	Total
1948	46,7	1,3	48,-	14,1	14,7	28,8	0,1	10,3	10,4	249,8	87,-	336,8	56,9	9,4	66,3
1951	71,1	1,7	72,8	17,1	21,-	38,1	0,05	12,19	12,24	329,-	104,4	433,4	90,3	13,7	104,-
1952	73,4	1,8	75,2	18,4	22,2	40,6	0,2	12,7	12,9	353,3	109,7	463,-	104,2	14,9	119,1
1953	77,2	1,9	79,1	20,5	21,-	41,5	0,1	13,4	13,5	404,6	109,6	514,2	115,1	19,2	134,3
1954	83,9	2,4	86,3	21,3	24,3	45,6	0,2	13,-	13,2	432,9	111,7	544,6	132,1	18,6	150,7
1955	92,3	1,7	94,-	24,1	25,5	49,6	0,06	15,38	15,44	512,8	116,2	629,-	147,-	23,2	170,2
1956	98,9	2,3	101,2	28,-	25,8	53,8	0,3	14,6	14,9	559,6	125,2	684,8	162,6	29,-	191,6
1957	102,8	2,8	105,6	32,6	24,8	57,4	0,2	15,7	15,9	583,-	133,4	716,4	170,3	39,4	209,7
1958	110,6	2,7	113,3	29,4	32,2	61,6	0,2	16,7	16,9	580,8	143,6	724,4	186,9	46,5	233,4
1959	119,9	2,6	122,5	31,9	32,6	64,5	0,2	17,3	17,5	656,-	140,-	796,-	214,-	50,-	264,-
1960	—	—	—	31,8	40,3	72,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—

La répartition de la production entre l'hydraulique et le thermique dépend des ressources naturelles des pays. Alors que la répartition est à peu près symétrique en France, la production hydraulique est pratiquement nulle en Grande-Bretagne et la production thermique pratiquement nulle en Suisse. Les

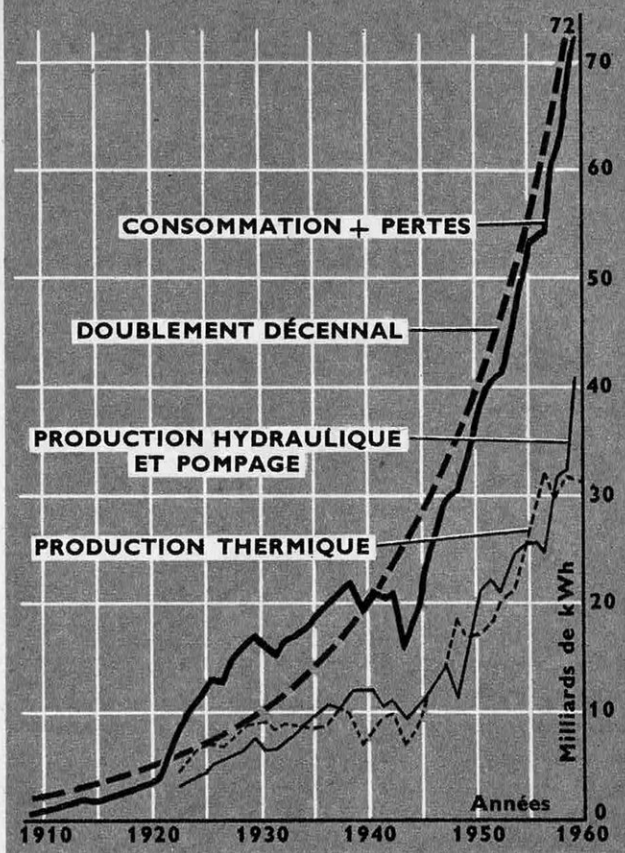
statistiques relatives aux États-Unis figurent dans le tableau pour mettre en évidence l'importance de la production d'énergie électrique dans ce pays (12 fois la production française). Enfin, l'U.R.S.S. est mentionnée car la production d'électricité y suit sensiblement une loi de doublement tous les cinq ans.

← Énergie électrique par habitant

On a porté sur ce graphique la production totale moyenne d'énergie électrique par habitant pour un certain nombre de pays, en kWh, et on a indiqué également, en noir, le chiffre de la consommation moyenne par habitant (représentant les usages domestiques, artisanaux et l'éclairage public).

Consommation et → production d'énergie électrique en France

On a tracé ici la loi du doublement décennal et la courbe réelle d'évolution qui la suit assez bien. Pendant la seconde guerre mondiale, les déclassements étaient supérieurs aux constructions et la production avait baissé; de plus, l'industrie était stagnante. La reprise amorcée dès 1945 est allée depuis en s'accroissant nettement.



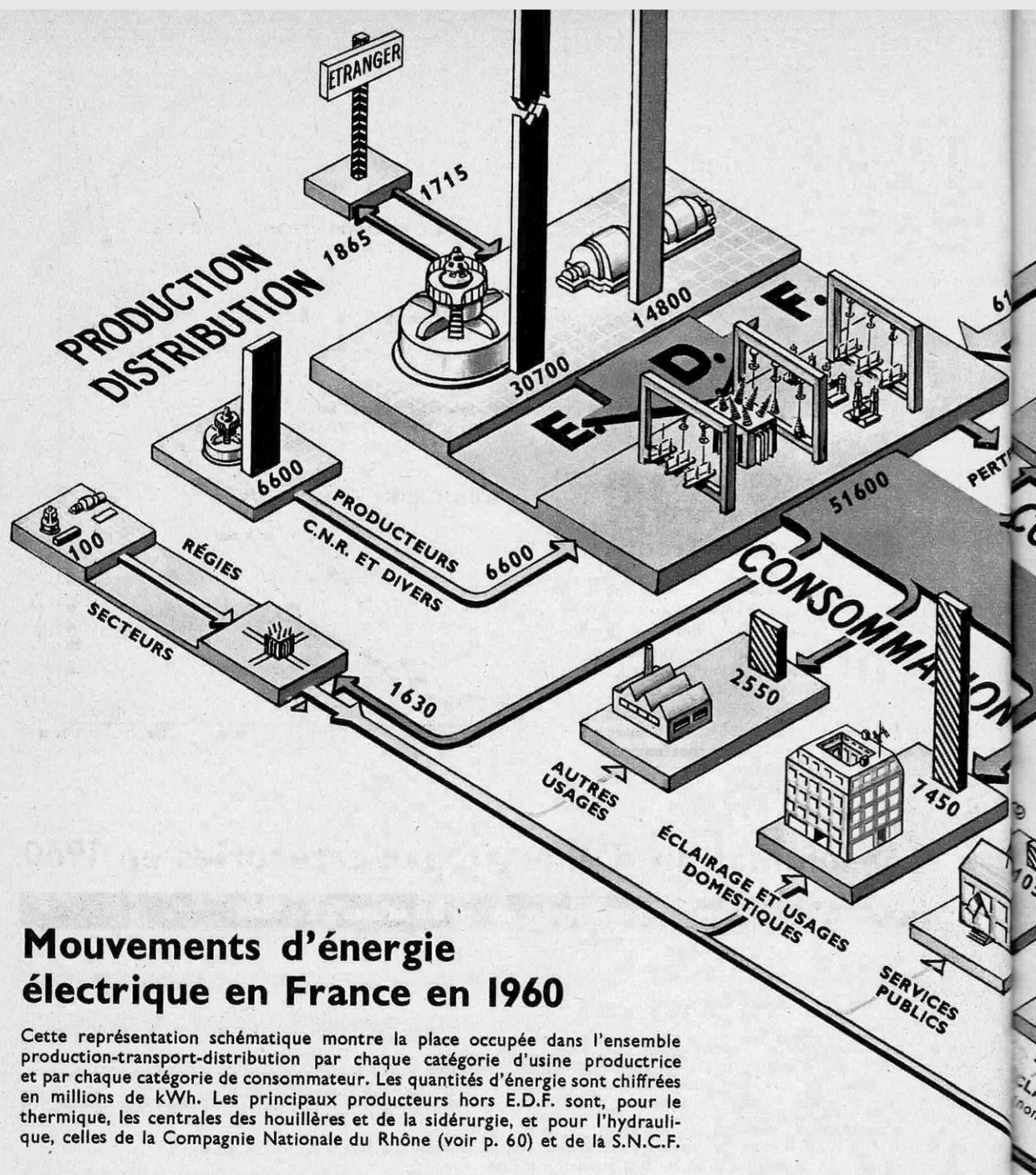
Consommation d'énergie par catégories en 1960

HAUTE TENSION: 52 550 MILLIONS DE kWh

HOUILLES ET LIGNITES	3 900
SIDÉRURGIE	6 200
TRANSPORTS FERROVIAIRES	3 500
ÉLECTRO-MÉTALLURGIE (métaux non ferreux - ferro-alliages)	6 450
ÉLECTRO-CHIMIE (carbures de calcium et de silicium, chlore, chlorates)	4 300
AZOTE, ACIDE PHOSPHORIQUE	1 950
INDUSTRIES : DES MÉTAUX, MÉCANIQUES ET ÉLECTRIQUES	6 000
FILATURES ET TISSAGES	2 450
PAPIER ET CARTON	2 900
AUTRES INDUSTRIES	14 900

BASSE TENSION : 12 550 MILLIONS DE kWh

SERVICES PUBLICS ET COMMUNAUX	1 050
ÉCLAIRAGE PRIVÉ NON DOMESTIQUE	1 500
ÉCLAIRAGE ET USAGES DOMESTIQUES	7 450
AUTRES USAGES	2 550



Mouvements d'énergie électrique en France en 1960

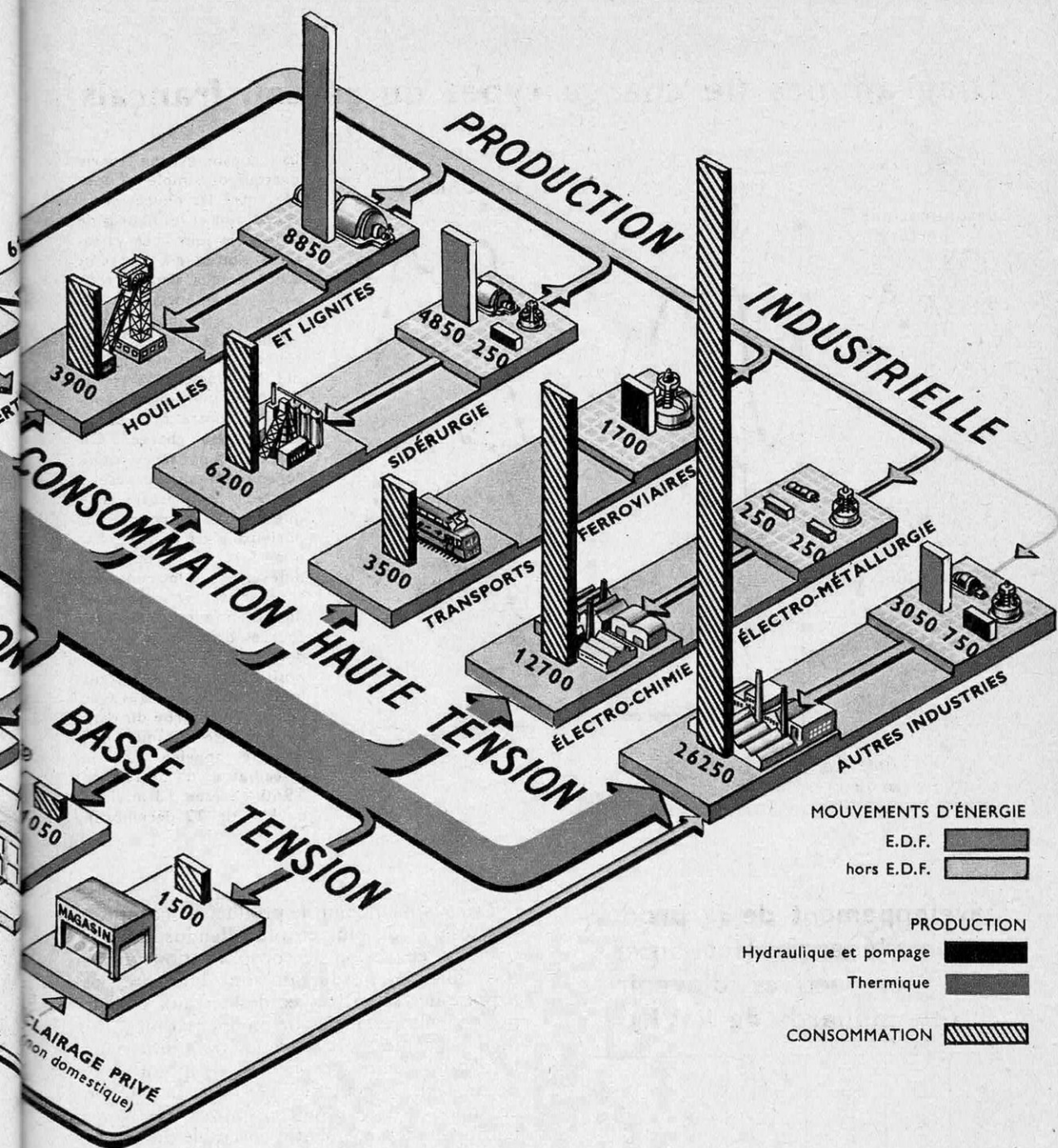
Cette représentation schématique montre la place occupée dans l'ensemble production-transport-distribution par chaque catégorie d'usine productrice et par chaque catégorie de consommateur. Les quantités d'énergie sont chiffrées en millions de kWh. Les principaux producteurs hors E.D.F. sont, pour le thermique, les centrales des houillères et de la sidérurgie, et pour l'hydraulique, celles de la Compagnie Nationale du Rhône (voir p. 60) et de la S.N.C.F.

l'avenue de l'Opéra pendant l'exposition de 1878; mais la première centrale de distribution fut celle du 8, rue du Faubourg-Montmartre, inaugurée le 20 juin 1887: elle alimentait 1 500 lampes et avait une puissance de 120 CV. Très rapidement la puissance augmentait: en 1890, on comptait déjà à Paris 3 900 kW pour les stations centrales, et la consommation de la France entière atteignait 0,310 milliards de kWh en 1900, 1,8 en 1913, 7,8 en 1932, 30 en 1948 et 72 en 1960.

En 1959, la production mondiale d'électricité était évaluée à 2 080 milliards de kWh dont 3,3 % pour la France qui représentait 1,6 % de la population.

Réseaux de distribution

Une grande particularité de l'électricité est qu'elle ne peut être stockée: à chaque instant, la production doit être égale à la consommation. Du fait de la répartition des activités

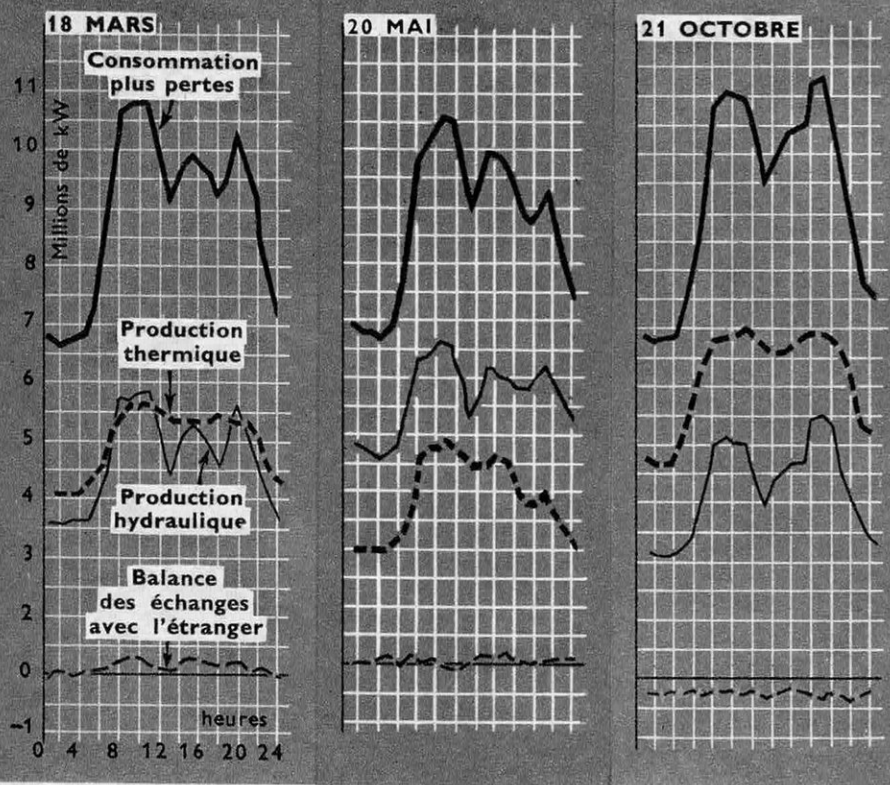


domestiques et industrielles dans la journée, la consommation varie presque du simple au double entre la nuit et les heures de pointes; de même, les consommations moyennes évoluent d'un jour à l'autre et d'un mois à l'autre de façon très importante.

Chaque réseau doit avoir, par conséquent, les moyens d'assurer la production de pointe alors que seules les centrales de base ont un très bon coefficient d'utilisation et un prix de revient faible; le producteur cherche donc

à amortir la variation de consommation par des tarifs différentiels (en France, le «tarif vert») qui décomptent l'électricité en fonction de la difficulté de sa fourniture et de sa répartition (à Paris, pour les usages domestiques, l'énergie des heures creuses de nuit est, avec le tarif trinôme, trois fois moins chère que l'énergie de pointe), par des accords avec les plus gros consommateurs et, dans certains pays ou à certaines époques, par des mesures autoritaires.

Diagrammes de charge types du réseau français



La consommation varie presque du simple au double entre les heures creuses de nuit et les heures de pointe le jour. Les variations d'un jour à l'autre et d'un mois à l'autre sont aussi très importantes. Les courbes se rapportent aux 18 mars, 20 mai et 21 octobre 1959, qui furent des troisièmes mercredis du mois, jour que l'expérience montre être particulièrement chargé. On voit que la puissance totale consommée sur le réseau (pertes comprises) telle que l'indique la courbe supérieure a été fournie chaque fois en proportion différente par les centrales thermiques et hydrauliques, en fonction des ressources disponibles de ces dernières, le complément, positif ou négatif, étant fourni par les échanges avec l'étranger (courbe du bas). La puissance maximum qui ait été appelée sur le réseau au cours de l'année 1960 a été de 13 millions de kW (le 22 décembre).

Développement de la production d'énergie électrique et perspectives d'avenir (en milliards de kWh)

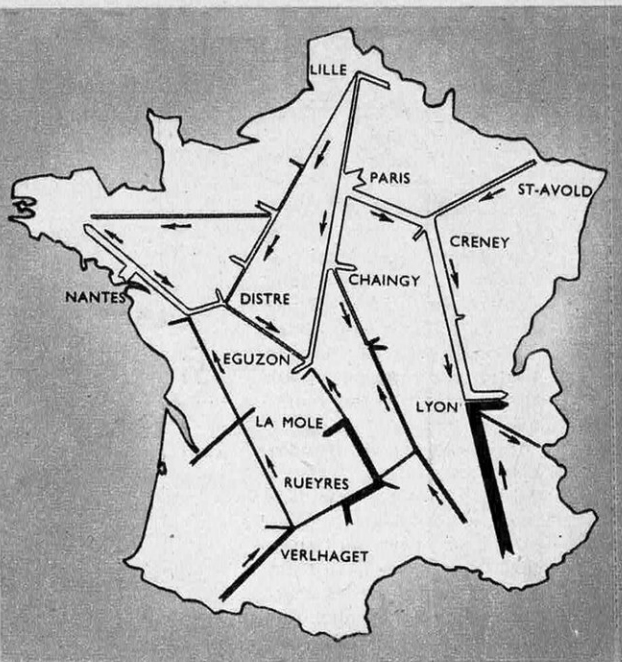
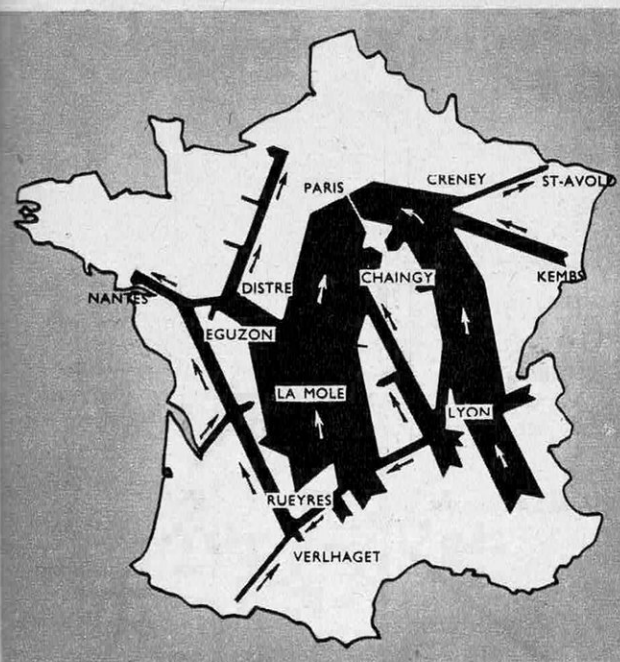
ANNÉE	FRANCE	ÉTATS-UNIS	U. R. S. S.	JAPON	GRANDE-BRETAGNE
1930	15	92	8,1	16	»
1938	21,2	147	39,6	33,13	24
1951	38,2	433,4	104	47,7	60
1957	57,5	715,7	209,5	79,3	99,9
1958	61,7	724	235,3	85,4	107
1965	107	1200	520	125	160
1975	275	2400	1500	200	275

Dans le même but, le producteur constitue des réseaux de plus en plus étendus sur lesquels la répartition de consommation ou les possibilités de production sont différentes, et il passe des accords avec des réseaux voisins pour améliorer l'effet de compensation (l'intérêt du câble France-Angleterre réside dans le décalage entre les heures de pointe des deux pays). La France a créé et accroît d'année en année un réseau de transport à très haute tension et, actuellement, l'ensemble du réseau européen (de l'Ouest) est interconnecté.

Transport à très haute tension

Mais le transport de l'électricité est extrêmement coûteux par les dépenses d'installation et d'entretien du matériel et par les pertes électriques dans le réseau.

Pour réduire ces pertes et frais d'installations, on augmente la tension électrique de transport. En France, les premières lignes à 150 000 V furent construites en 1923, les



Mouvements d'énergie interrégionaux

Les excédents des régions fortement productrices sont écoulés vers les autres régions par le réseau d'interconnexion. Ils ne comprennent pas les mouvements d'énergie intérieurs à chaque région qui sont effectués par des réseaux de tension moins élevée. En France, les possibilités de production excédentaire sont principalement concentrées, pour l'énergie hydraulique dans la zone sud, et pour l'énergie thermique dans la zone nord. L'énergie hydraulique étant toujours produite en priorité, lors-

que l'hydraulicité est favorable, les excédents hydrauliques se déplacent du Sud vers le Nord. Au contraire, quand l'hydraulicité est défavorable, ce sont des excédents thermiques qui se déplacent du Nord vers le Sud. Les 2 cartes schématisent ces mouvements d'énergie à deux instants de l'année choisis comme représentant des cas extrêmes et opposés. Les mouvements d'énergie sont exprimés par des canaux d'une largeur proportionnelle à la puissance transportée et par des flèches indiquant le sens.

premières lignes à 225 000 V furent mises en service en 1932 et celles à 380 000 V en 1958.

Malgré ces efforts, les pertes dans le réseau français ont atteint, en 1960, 6,9 milliards de kWh pour une production totale de 72,1 milliards et celles du réseau des États-Unis ont été, en 1959, de 64,7 milliards de kWh, soit la production française, sur 794 milliards.

Si le réseau de transport facilite la répartition d'énergie produite au mieux des besoins et améliore l'utilisation des moyens de production, il ne dispense donc pas d'une recherche d'équilibre régional entre la production et la consommation.

L'impossibilité de stockage est une caractéristique de l'électricité, l'importance considérable de ses infrastructures en est une autre. L'utilisateur trouve extrêmement commode d'avoir à domicile, à tout instant, l'énergie dont il a besoin, mais ceci oblige le fournisseur à construire tout un réseau de lignes de répartition et de distribution qu'il faut développer et renforcer au fur et à mesure de

l'augmentation du nombre des abonnés et de la puissance demandée par chacun car, dans ce domaine, comme pour le transport, c'est la puissance maximum instantanée qui sert de référence au dimensionnement du réseau.

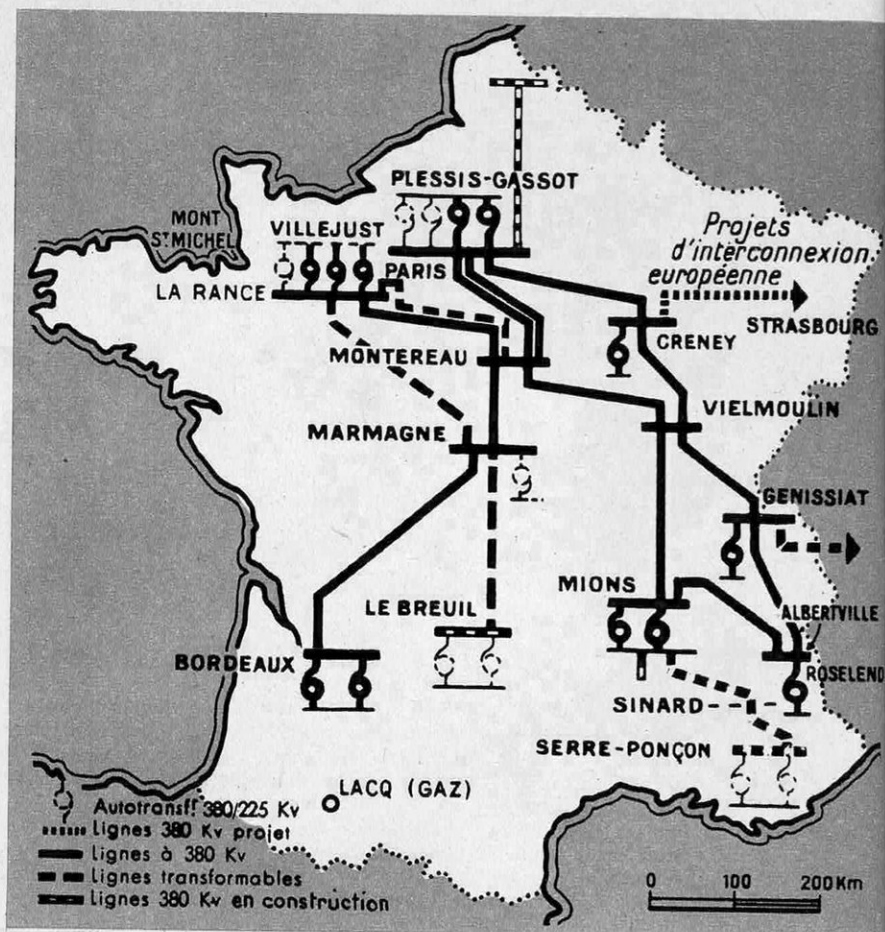
Prévisions d'équipement

L'importance des infrastructures et l'augmentation de la consommation, avec le développement corrélatif des moyens de production, des réseaux de transport, des réseaux de répartition et de distribution font de l'industrie électrique le secteur économique qui nécessite les plus gros investissements relatifs : le rapport d'investissement annuel au chiffre d'affaires y atteint, en effet, 0,60 à 0,70.

Du fait de l'importance des dépenses d'investissement et du délai relativement long de réalisation des nouveaux moyens de production, c'est dans l'énergie électrique que se fait sentir, de façon la plus pressante, le besoin

Le réseau d'interconnexion

Les pièces maîtresses du réseau de transport sont constituées par les lignes à 380 000, 225 000 et 150 000 V. Ces hautes tensions s'imposent pour transporter avec les moindres pertes une puissance considérable à de grandes distances (une ligne à 380 000 V comme Génissiat-Plessis-Gassot peut transporter jusqu'à 600 000 kW). Au total 23 000 km de lignes environ. La part la plus importante est constituée par le réseau très dense à 225 000 V qui couvre l'ensemble de la France. Le réseau à 150 000 V, plus limité, voit sa croissance arrêtée au profit du réseau 225 000 V. Le réseau exploité à 380 000 V, bien qu'encore limité à une ligne Albertville-Génissiat-Paris (520 km), va s'étendre notablement à partir de cette année comme le montre la carte ci-contre.



de prévisions à long terme pour éviter, d'une part, des investissements inutiles, d'autre part, une insuffisance de moyens qui entraverait le développement industriel.

Frais de combustible

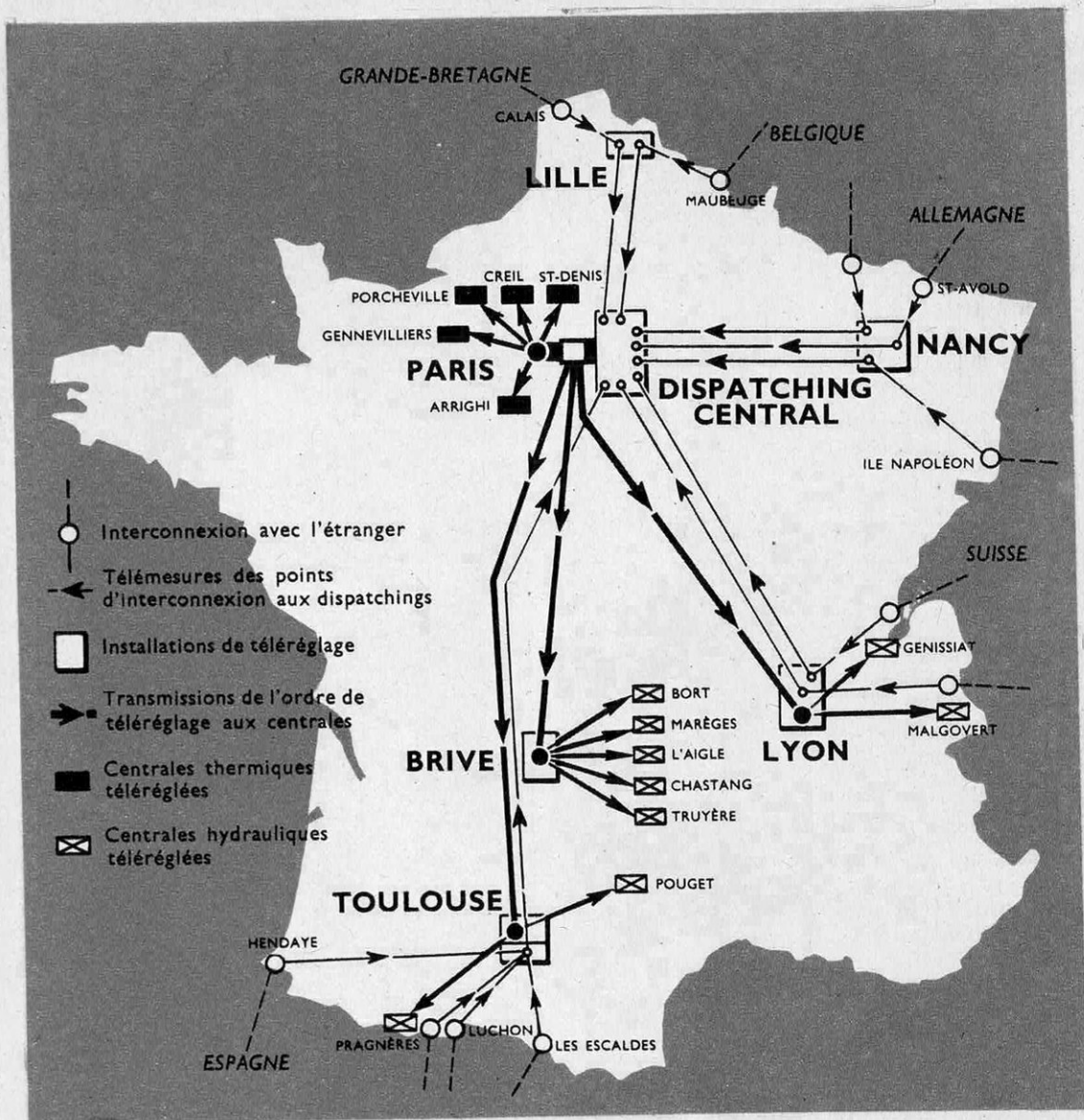
Jusqu'à ces dernières années, l'électricité avait pour origine soit l'énergie hydraulique, soit l'énergie d'un combustible fossile; à la suite des découvertes atomiques elle peut, désormais, avoir également pour source l'énergie nucléaire, mais la structure du prix de revient de l'électricité à partir de ces trois sources est très différente.

Le « combustible » de la production hydraulique est gratuit, l'eau arrive à l'aménagement hydroélectrique sans aucune intervention humaine. Au contraire, les frais de combustible représentent une part très importante du prix du kWh d'origine thermique : ils ont atteint en moyenne 2,81 nouveaux centimes par kWh, en 1960, dans les centra-

les d'Electricité de France; avec les perspectives actuelles d'augmentation du rendement des installations et de diminution du prix du combustible, les frais de combustible diminueraient progressivement jusqu'à 2 nouveaux centimes par kWh dans une quinzaine d'années. A la même époque, les dépenses de combustible seraient de 1 nouveau centime par kWh dans les futures centrales nucléaires.

Frais d'investissement

En contrepartie, les dépenses d'investissement sont très fortes pour la production hydraulique : de l'ordre de 0,40 à 1 Nouveau Franc par kWh annuel suivant la qualité de l'énergie fournie (fil de l'eau, éclusées, lacs). Pour une centrale thermique moderne qui fonctionne en base du programme, c'est-à-dire 5 400 heures environ par an, l'investissement par kWh annuel est trois fois plus faible que l'investissement par kWh hydraulique moyen.



Les échanges d'énergie aux frontières

L'interconnexion du réseau français avec ceux des pays limitrophes et le développement des liaisons aux autres frontières de ces pays, font que la plupart des pays de l'Ouest de l'Europe sont interconnectés de façon quasi-permanente. La Grande-Bretagne sera elle aussi reliée au réseau français par un câble sous-marin dans quelques mois. Le réglage du réseau français pour que soient assurés dans les meilleures conditions de stabilité les échanges d'énergie aux frontières suivant les programmes établis, est automatique et centralisé. Les télémesures effectuées aux frontières sont, comme le montre la carte schématique ci-dessus, transmises à des dispatchings régionaux (Lille, Nancy, Lyon, Toulouse) et de là au dispatching central de Paris qui élabore avec ses

appareils le « niveau » de réglage (N). Ce « niveau » est transmis aux dispatchings régionaux de Paris, Brive, Toulouse et Lyon qui en assurent la diffusion vers les centrales réglantes; la puissance de chacune d'elles, ou plus exactement de chacun de ses groupes réglants, varie alors en fonction du « niveau » indiqué proportionnellement à la largeur de la bande de réglage prévue pour elle. Aux centrales ici représentées viendront s'ajouter bientôt les centrales de Montereau, Roselend et Orlu qui représentent ensemble plus de 800 000 kW de puissance totale en 10 groupes, ce qui permettra d'augmenter de près de 200 000 kW la bande de réglage à la disposition du dispatching central, bande qui est actuellement voisine de 500 000 kW.

Actuellement, avec une hypothèse de durée de fonctionnement des centrales nucléaires égale à celle des centrales thermiques classiques les plus modernes, l'investissement par kWh annuel est sensiblement égal en énergie nucléaire et en énergie hydraulique; mais l'amélioration du rendement et les perfectionnements techniques permettent d'espérer une réduction de plus de moitié du prix d'installation des centrales nucléaires dans une dizaine d'années.

Du fait de cette différence de prix de construction de centrales et de frais de combustible, le taux d'intérêt financier et les durées d'amortissement pris en compte ont une grande influence sur le prix relatif du kWh, aux bornes des centrales, suivant l'énergie d'origine.

Sources d'énergie primaires et ressources nationales

La répartition effective des sources d'énergie électrique dans les différents pays est fonction de ces prix de revient, mais elle est principalement commandée par les ressources naturelles nationales.

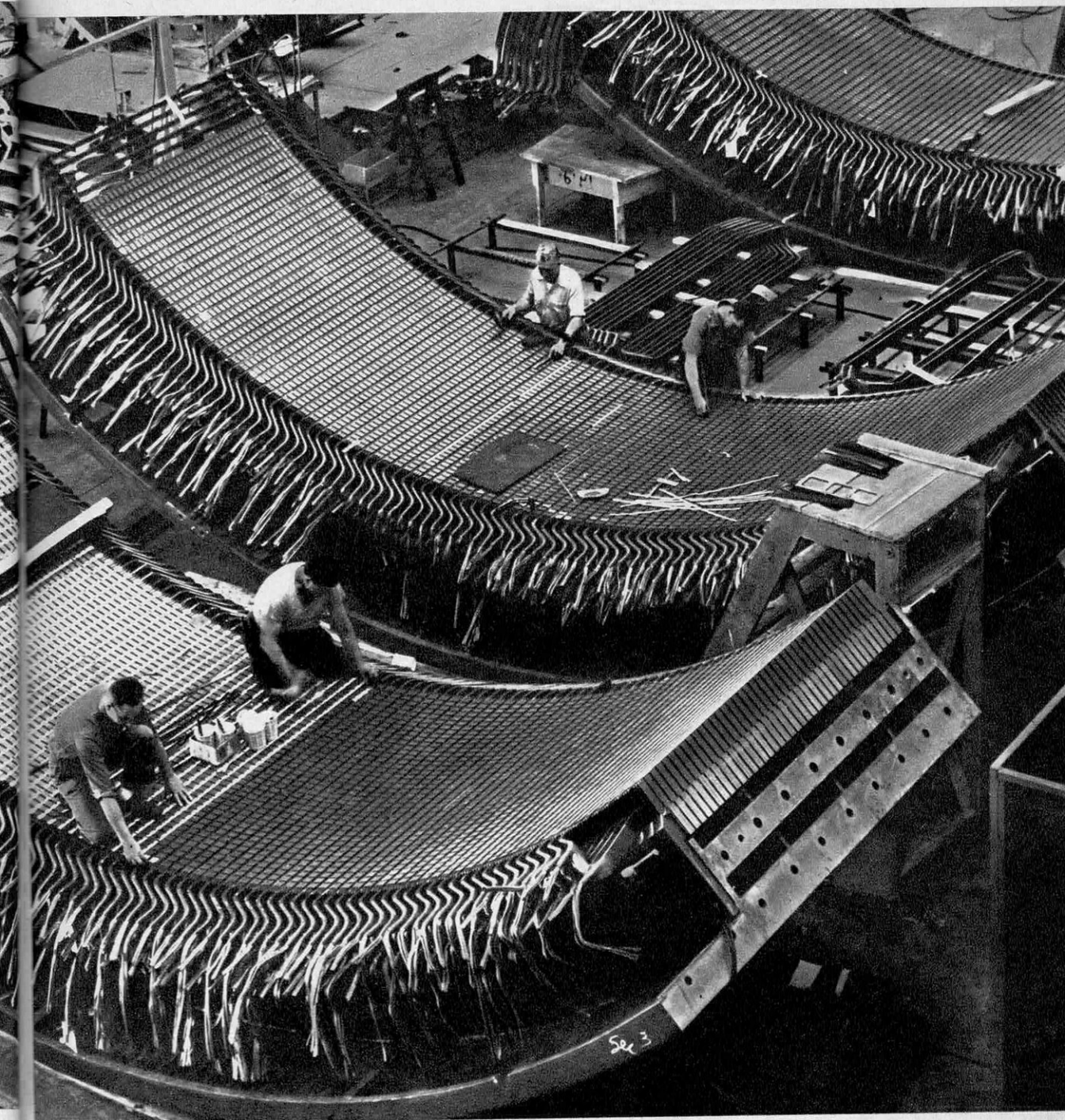
La France dispose d'un potentiel hydraulique important; son potentiel économiquement exploitable est évalué à 80 milliards de kWh par an : il est déjà bien aménagé puisque les usines en service ou en construction représentent une production moyenne annuelle de 42 milliards de kWh. Ce potentiel étant presque exclusivement situé dans la moitié Sud-Est du pays, la production thermique a été développée dans la moitié Nord-Ouest avec les ressources nationales ou du combustible importé; la production totale se répartit également entre la production thermique et la production hydraulique.

Ce partage égal ne se fait plus pour la construction de nouvelles centrales. L'équipement hydraulique se poursuit à un rythme constant qui correspond à l'aménagement de la totalité du potentiel exploitable dans une vingtaine d'années. Le complément, nécessaire à la satisfaction de la consommation des prochaines années, est assuré par l'équipement thermique classique, ce qui entraînera d'ailleurs une importante augmentation des besoins en combustibles. Le programme nucléaire actuel ne prévoit que la construction à un rythme constant de quelques grandes centrales; il doit permettre à l'industrie de se familiariser avec les problèmes que posent leur construction et leur exploitation pour se préparer à un développement très rapide des filières et des procédés qui se seront révélés les plus intéressants.



Des alterna

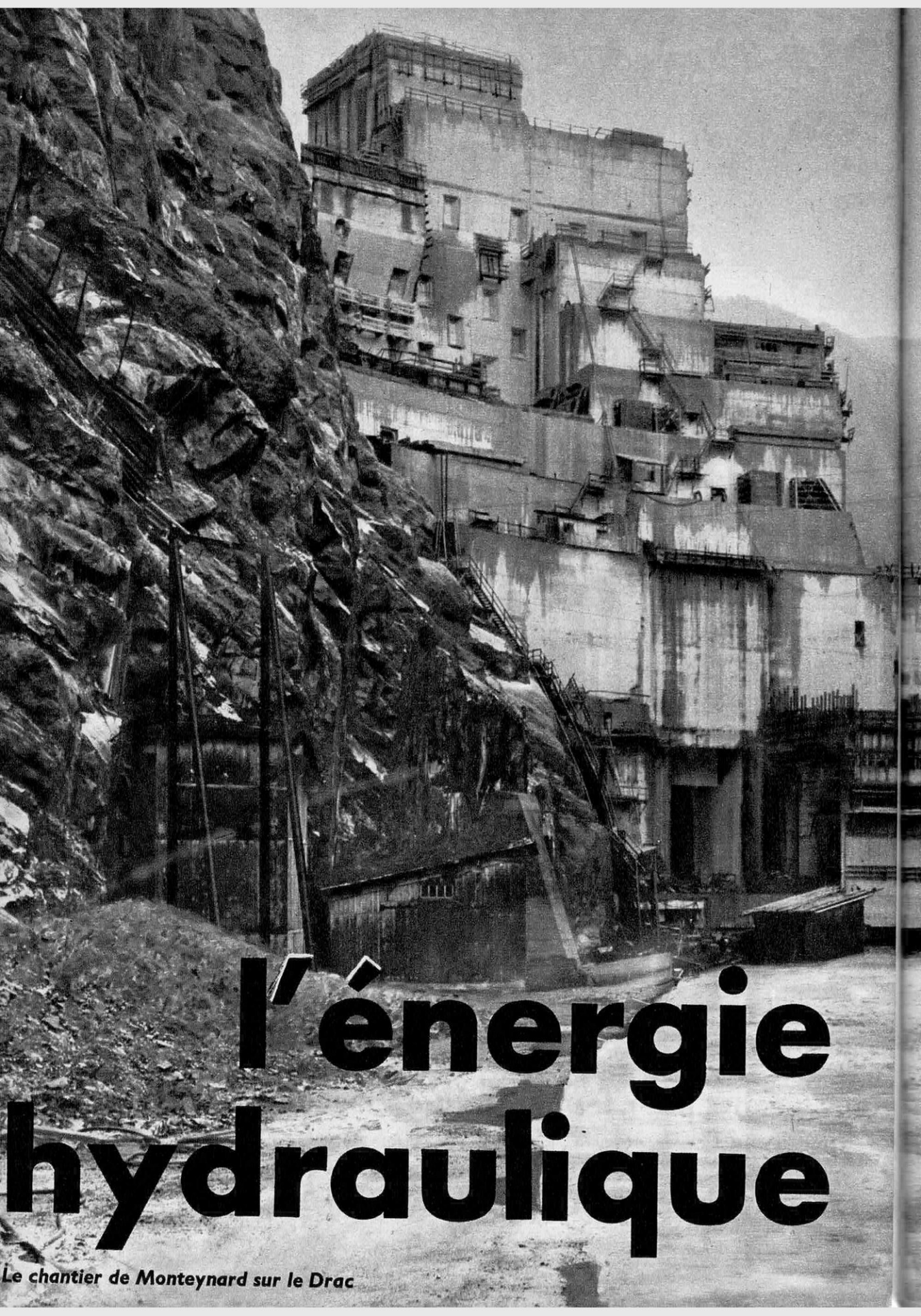
Le nouvel équipement des chutes du Niagara, en cours de construction, dotera les États-Unis du plus puissant aménagement hydroélectrique du monde occidental. Avec 2 190 000 kW installés (y compris les 240 000 kW d'une usine voisine existante), il



a teurs géants pour les chutes du Niagara

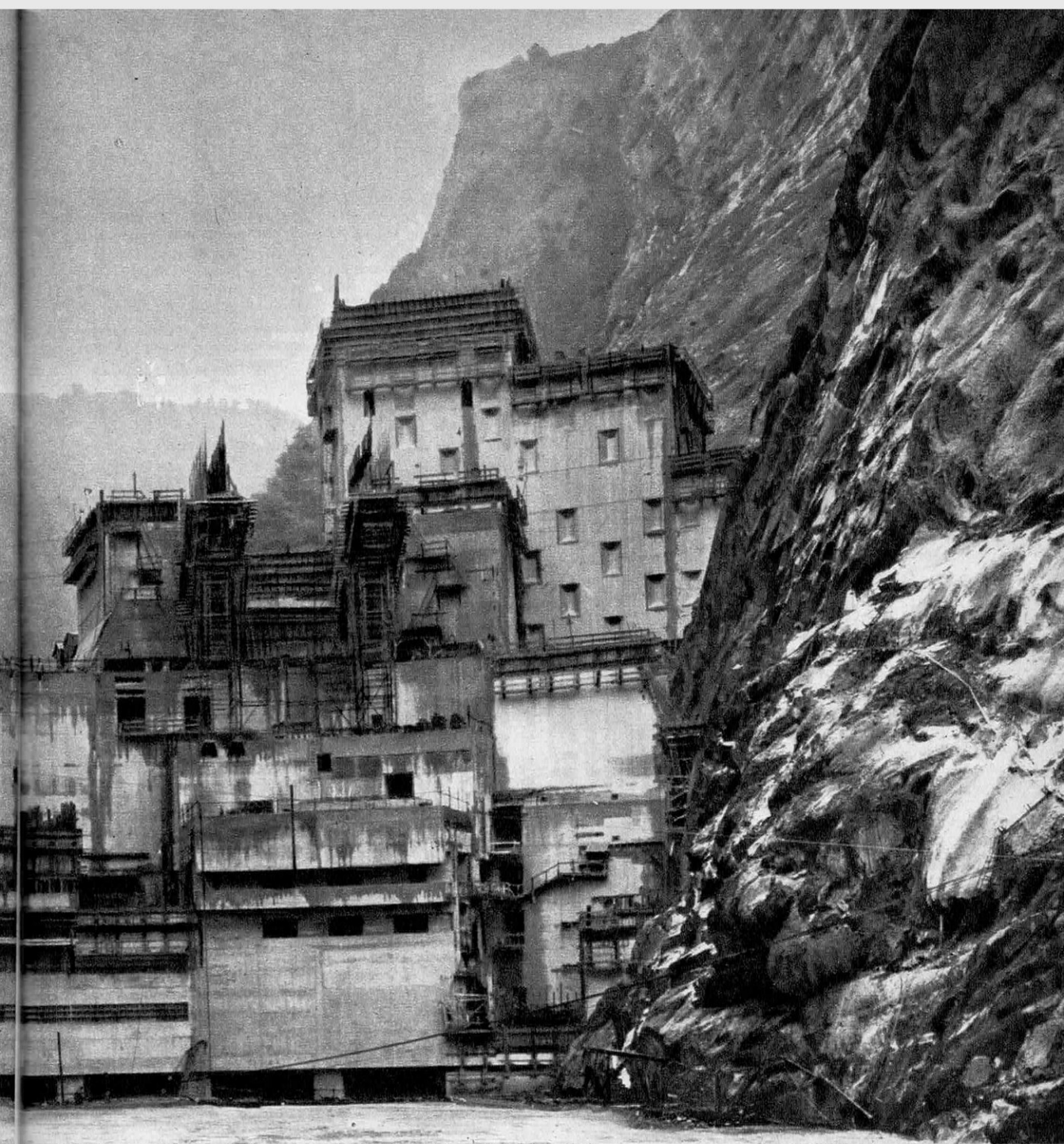
battrà le barrage de Grand Coulee sur la rivière Columbia qui détenait jusqu'ici le record des centrales hydrauliques américaines avec près de 2 millions de kW. La nouvelle usine comporte 13 turbo-alternateurs pesant chacun 1115 tonnes et déve-

loppant 150 000 kW, les plus puissants construits jusqu'ici aux U.S.A. Nous voyons ici une des 52 sections de stators réalisés par Westinghouse. Les rotors pesant près de 600 tonnes auront 12 m de diamètre et tourneront à 120 tours par minute.



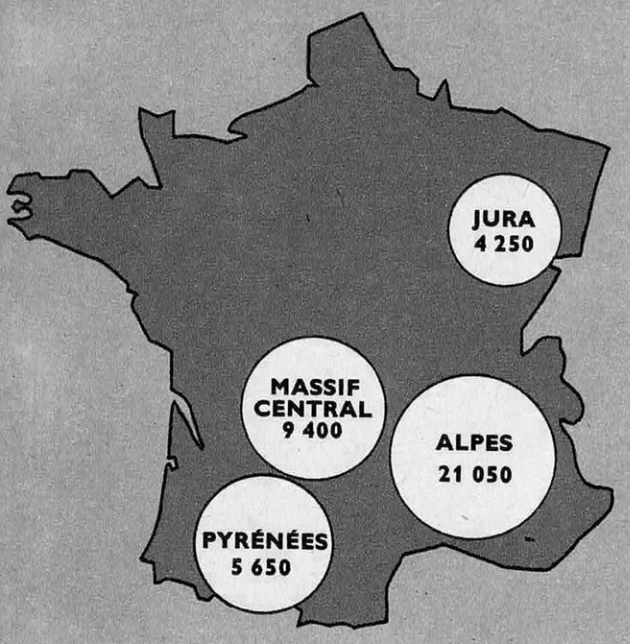
l'énergie hydraulique

Le chantier de Monteynard sur le Drac



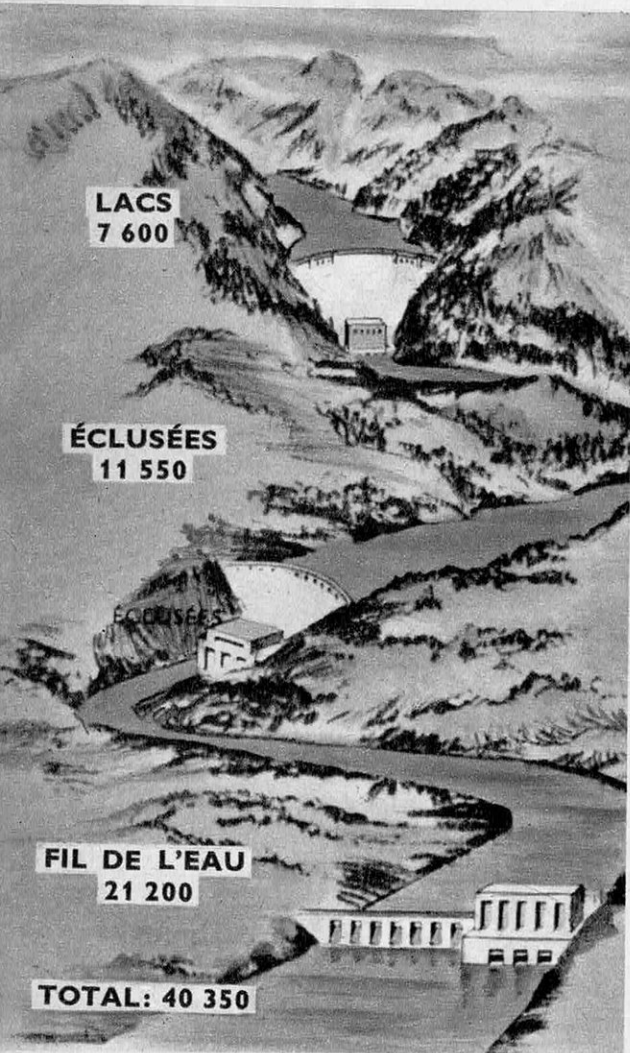
LA pluie et la neige amènent sur la surface du sol de l'eau qui se rassemble en ruisseaux, torrents et rivières, lesquels rejoignent la mer par des trajets plus ou moins longs et à des vitesses plus ou moins rapides.

Cette eau a une puissance de travail considérable ; lentement elle a creusé le sol et modelé le relief que nous connaissons. À l'état sauvage, l'eau dissipe son énergie en tourbillons et en érosion. Depuis longtemps, l'homme a cherché à utiliser cette force gaspillée. Dans Paris, sous Henri IV, la « Samaritaine »,



← Production hydraulique 1960

Sur un total de 40 350 millions de kWh, 30 700 ont été produits par les aménagements d'Électricité de France. La répartition indiquée distingue les grands massifs montagneux, le Jura et la vallée du Rhin pouvant être rattachés aux Alpes et les autres régions de production hydraulique minime étant rattachées au Massif Central. La production hors E.D.F. est principalement constituée par celles des usines hydrauliques qui appartiennent à la S.N.C.F. et à la Compagnie Nationale du Rhône.



près du Pont-Neuf, était une machine hydraulique entraînée par le courant de la Seine pour alimenter en eau le Louvre, les Tuileries et le Palais-Royal. Et les vieilles gravures nous montrent qu'au Moyen Âge, des bateaux amarrés au bord de la Seine portaient des grandes roues à aubes.

Mais, sous forme mécanique, l'énergie est très difficilement transportable; elle doit être utilisée au lieu de production et c'est une des raisons pour lesquelles les torrents de montagne, dans des régions peu peuplées, étaient relativement mal équipés, alors qu'au contraire la plupart des petites rivières de plaine étaient canalisées en multiples biefs de moulins.

La découverte de l'électricité, après la prodigieuse expansion industrielle du siècle dernier, a développé considérablement l'exploitation de l'énergie hydraulique. Le principe de l'utilisation est simple : au lieu de laisser l'énergie de l'eau se perdre en agitations et frottements dans le lit naturel de la rivière, on crée un cheminement plus favorable de façon à pouvoir disposer de l'énergie non gaspillée pour actionner une turbine qui entraînera l'alternateur produisant l'électricité.

L'expérience, maintenant énoncée sous forme des lois de l'hydraulique, montre que, lorsqu'il y a écoulement entre deux points, à des niveaux différents, il existe une « perte de charge » qui représente la perte d'énergie potentielle de l'eau sur son trajet. Cette perte

← Les trois catégories d'usines

Les usines hydrauliques se classent en trois catégories : lac, éclusée, fil de l'eau, suivant leur possibilité de modifier la répartition naturelle dans le temps du débit qui les alimente. Les usines au fil de l'eau ne réalisent aucun stockage appréciable. Les réservoirs d'usines d'éclusées stockent l'eau pendant la nuit pour la libérer le jour aux heures de pointe. Ceux des usines de lacs créent une régularisation saisonnière entre périodes de hautes et basses eaux.

de charge est d'autant plus faible que la vitesse d'écoulement est plus réduite, la section plus grande, la rugosité et la longueur de la surface des parois plus faible, la longueur du trajet plus courte.

Mais la vitesse intervient par son carré, c'est-à-dire que si l'on divise la vitesse par deux, la perte d'énergie par frottement est divisée par quatre. Or la vitesse est le quotient du débit par la section d'écoulement. On voit donc l'influence considérable de la section de passage offerte.

Les barrages en rivière ont pour effet d'augmenter la section d'écoulement en élevant le niveau du plan d'eau; c'était, en général, le procédé utilisé pour les moulins placés directement sur les cours d'eau. Les dérivations dans les canaux ou galeries améliorent l'écoulement, à la fois par augmentation de section et par diminution de rugosité, ainsi que, dans certains cas, par réduction du trajet de l'eau.

L'énergie sauvage d'un tronçon de rivière est, en unités convenables, égale au produit du poids de l'eau qui s'écoule par la différence de niveau entre les deux extrémités du tronçon. On voit donc que cette énergie sauvage dépend de deux caractéristiques différentes : l'une hydrologique, le débit de la rivière; l'autre topographique, la différence de niveau.

Jamais la récupération d'énergie n'est totale, parce que, même si le nouveau cheminement artificiel crée des pertes de charge beaucoup plus faibles que le cheminement naturel,

il faut néanmoins une perte de charge pour assurer l'écoulement.

L'aménagement d'une rivière a pour but de transformer en énergie potentielle récupérable l'énergie sauvage gaspillée mais, une fois obtenue cette énergie récupérable, il convient de la transformer en énergie mécanique, puis électrique.

Les éléments de base d'un aménagement hydraulique

En théorie, un aménagement hydraulique comprend :

- un ouvrage permettant de dériver l'eau en relevant plus ou moins le plan d'eau dans la rivière; cet ouvrage, barrage et prise d'eau, peut servir à accumuler une certaine réserve d'eau;

- des ouvrages d'amenée, canaux ou galeries qui conduisent l'eau jusqu'à l'endroit choisi pour utiliser la chute disponible. Ces ouvrages se terminent par une conduite forcée qui, prenant l'eau à la cote d'amenée, la dirige vers la turbine en transformant l'énergie potentielle, due à la dénivellation, en énergie de pression utilisable par la roue;

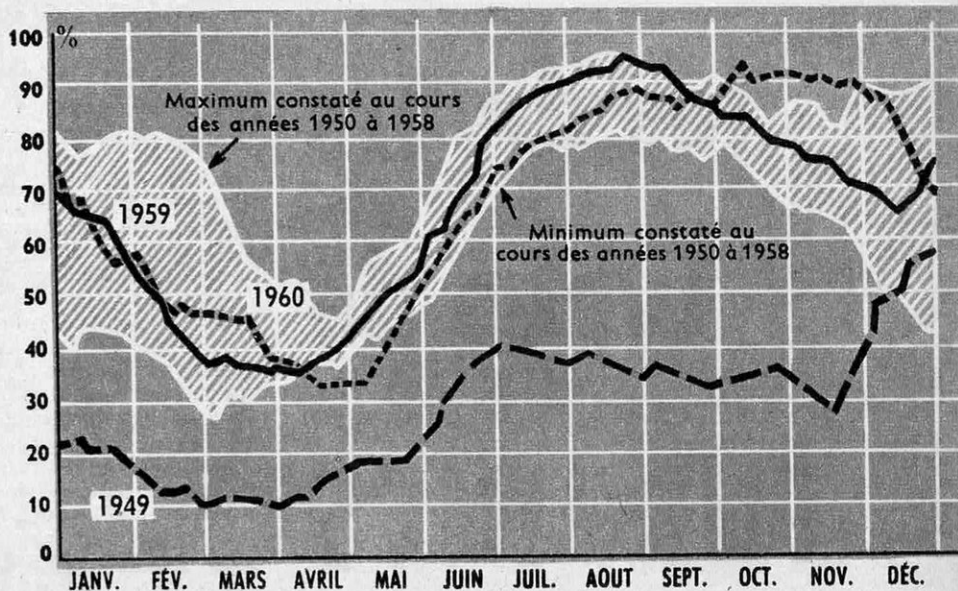
- des groupes, ensembles turbine-alternateur, produisant l'électricité; ils sont en général installés avec leurs matériels annexes (vannes, excitatrices, régulateur, transformateur) dans une usine;

- un canal ou galerie de fuite qui reconduit l'eau utilisée en rivière, au niveau de la restitution.

SUITE PAGE 58

Taux de remplissage en énergie

Les réservoirs hydrauliques saisonniers, ceux dont la capacité permet le stockage des excédents de débit des hautes eaux jusqu'à la saison suivante où ils sont utilisée, ont des taux de remplissage extrêmement variables d'une année à l'autre. L'année 1949 est indiquée à part en raison de la sévérité de ses minima. On a tracé les courbes de ce coefficient pour 1959 et 1960 et celles des chiffres extrêmes atteints au cours de la période 1950-1958.





← Les roues Kaplan équipent les basses chutes à grand débit. Ce sont des sortes d'hélices qui sont toutes maintenant à pales orientables. Ci-contre, à gauche, une roue Kaplan en montage à l'usine de Marckolsheim sur le Rhin; son diamètre est de 9,25 m, et son poids voisin de 180 t.

→ Les roues Pelton sont utilisées pour les fortes chutes à faible débit; des augets en forme de cuillères sont attaqués par un ou deux jets tangentiels. Ci-contre à droite, une roue Pelton à deux jets de l'usine de La Bathie qui reçoit les eaux du barrage de Roselend.

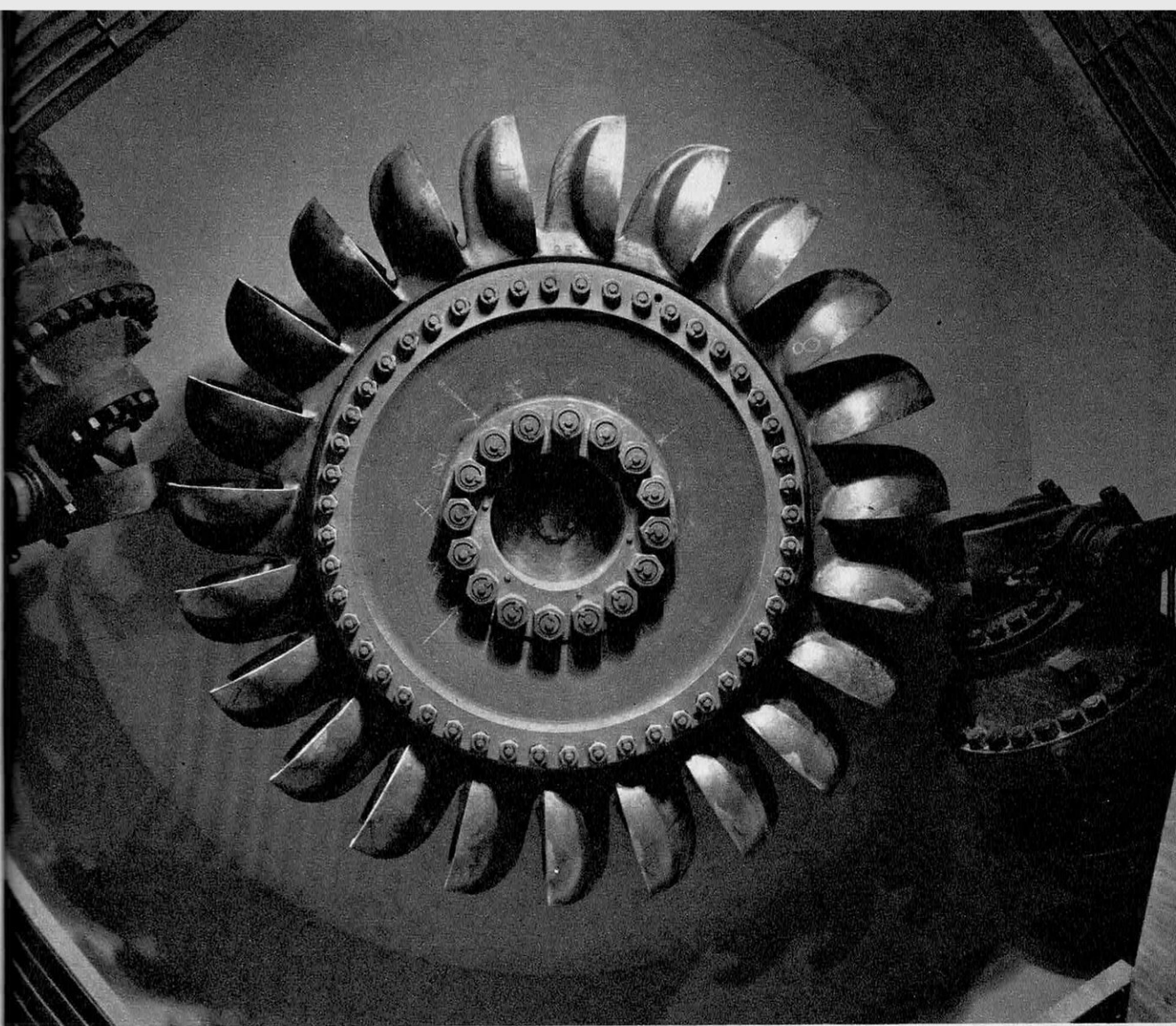
les divers types de TURBINES

POUR utiliser l'énergie hydraulique, la turbine est l'organe essentiel; c'est elle qui reçoit l'effort de l'eau et le transforme en énergie mécanique. Cette dernière peut être soit utilisée directement comme dans les moulins, soit convertie en électricité par l'intermédiaire d'alternateurs dont la turbine entraîne le rotor qui crée le courant électrique aux bornes du stator.

L'antique roue à aubes des vieux moulins a subi beaucoup de transformations pour aboutir aux turbines modernes. Les premières vraies turbines sont dues à Fourneyron qui, en 1837, a équipé à Saint-Blasien en Forêt Noire, dans le Pays de Bade, une chute de 112 m alimentée par des conduites forcées.

Actuellement il existe trois types de turbines.

Pour les basses chutes, on utilise des roues dites « Kaplan », du nom d'un de leurs promoteurs. Ce sont des sortes de grandes hélices, qui travaillent à l'inverse des hélices de bateaux. Elles ont des pales orientables pour s'adapter



aux variations de régime. Les roues-hélices à pales fixes ont un rendement moins bon et, quoique plus économiques car beaucoup plus simples, elles sont de moins en moins utilisées.

Les hautes chutes sont équipées avec des roues « Pelton ». Ces roues comportent une couronne d'augets de forme appropriée, en doubles cuillères accolées, sur laquelle l'eau, convenablement canalisée par un ou plusieurs ajutages, est projetée en jets qui se réfléchissent sur les profils en cuillère.

Pour les chutes intermédiaires, on utilise des roues du type « Francis ». Ce sont des séries d'aubes inclinées entre deux couronnes ; la forme des aubes est fonction des caractéristiques de la chute et du débit.

La limite de hauteur de chute correspondant aux divers types de roues n'est pas fixée de façon précise et évolue avec la technique ; le choix du type fait également intervenir le débit unitaire de chaque roue.

Les turbines « Pelton » ne peuvent admettre qu'un faible débit, au maximum quelques m^3/s (usine de La Bathie-Roselend : 6 groupes équipés chacun pour $8,33 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 1 200 m avec une turbine Pelton à deux injecteurs ; Pragnères : 2 groupes utilisant chacun $7,03 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 1 150 m avec deux roues à un jet).

Les turbines « Francis » admettent des débits plus importants (Serre-Ponçon : 4 groupes de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 124 m maximum ; Chastang : 3 groupes de $135 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 72 m).

Les roues « Kaplan » sont utilisées pour les très gros débits sous relativement faibles chutes (Marckolsheim : 4 groupes de $350 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 13 m environ ; Jouques : 3 groupes de $83 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 30 m environ).

Pour chaque chute, le choix du type de la turbine et le tracé de sa forme sont le résultat d'études soignées, complétées dans la plupart des cas par des expériences sur modèle réduit.

Deux types fondamentaux sont à la base des schémas d'aménagements hydrauliques : les aménagements par dérivation, les aménagements par barrage.

Les aménagements par dérivation

Les aménagements par dérivation comportent un barrage et une prise peu importants mais, au contraire, des ouvrages d'amenée très développés; ce type d'aménagement s'applique aussi bien en montagne qu'en plaine. Dans un tel aménagement on crée un cheminement artificiel réduisant les pertes de charge.

Ainsi, pour le Grand Canal d'Alsace, sur la longueur d'un bief de 17 km, le Rhin, qui s'écoule à une vitesse d'environ 2,5 m/s pour un débit de 1 000 m³/s, perd approximativement 16 m de hauteur. Dans le canal, pour le même débit, il circule à une vitesse de 0,90 m/s ce qui permet, par simple réduction de vitesse, d'obtenir une hauteur de chute récupérable de 14 m. Mais cette réduction de vitesse s'accompagne d'une diminution de la rugosité des parois — canal lisse au lieu de rivière naturelle à fond irrégulier avec des épis, si bien que, pour le bief de Fessenheim, avec une différence naturelle de niveau de 15,90 m, on obtient une chute nette, utilisable par les turbines, de 15,10 m.

L'aménagement de Malgouvert est un exem-

ple analogue en montagne : l'eau prise au pied du barrage de Tignes, au lieu de s'écouler jusqu'à Bourg-Saint-Maurice dans le lit même de l'Isère, est conduite par une galerie de 16 m² de section et 15 km de long jusqu'en face de Bourg-Saint-Maurice puis, par des conduites forcées, aux turbines « Pelton » qui utilisent l'énergie des 750 m de chute avant que l'eau ne soit restituée en rivière.

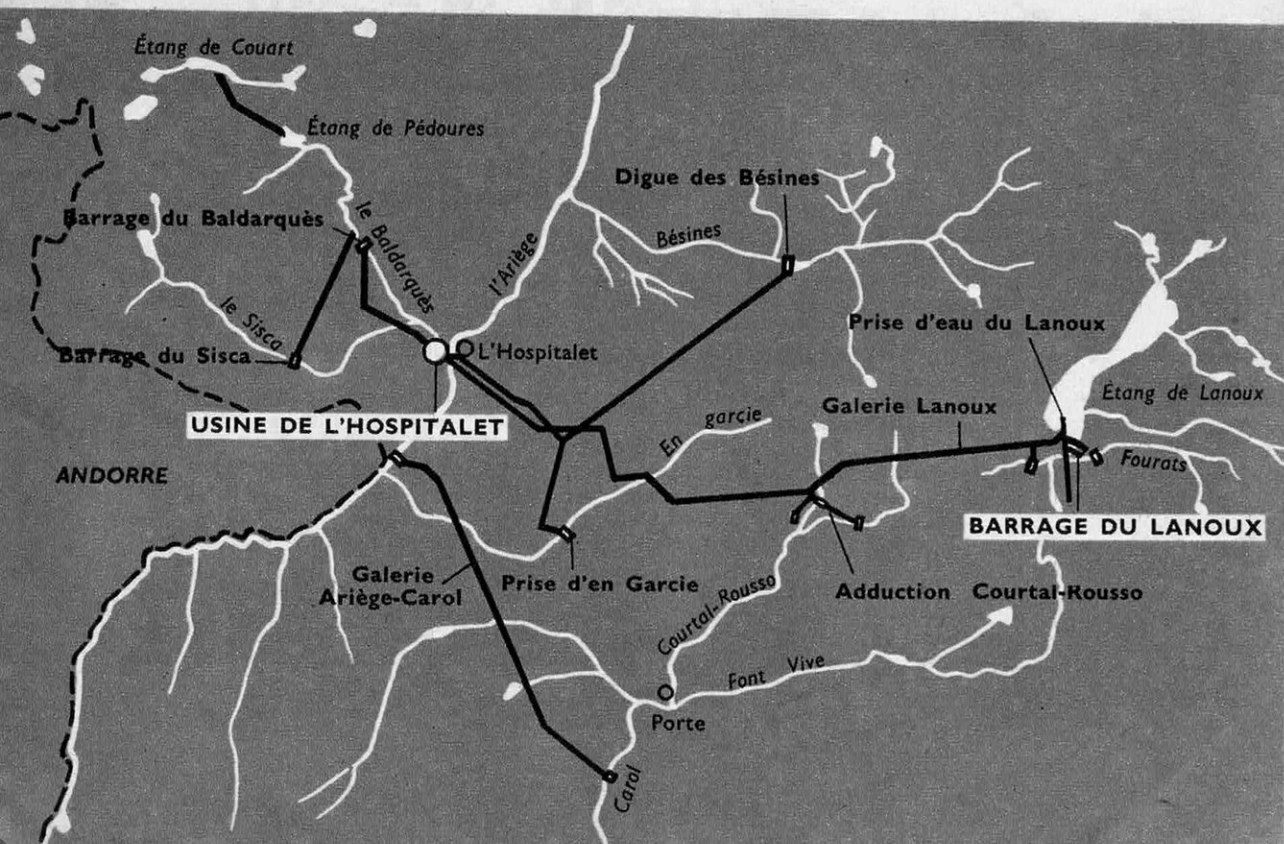
Les usines-barrages

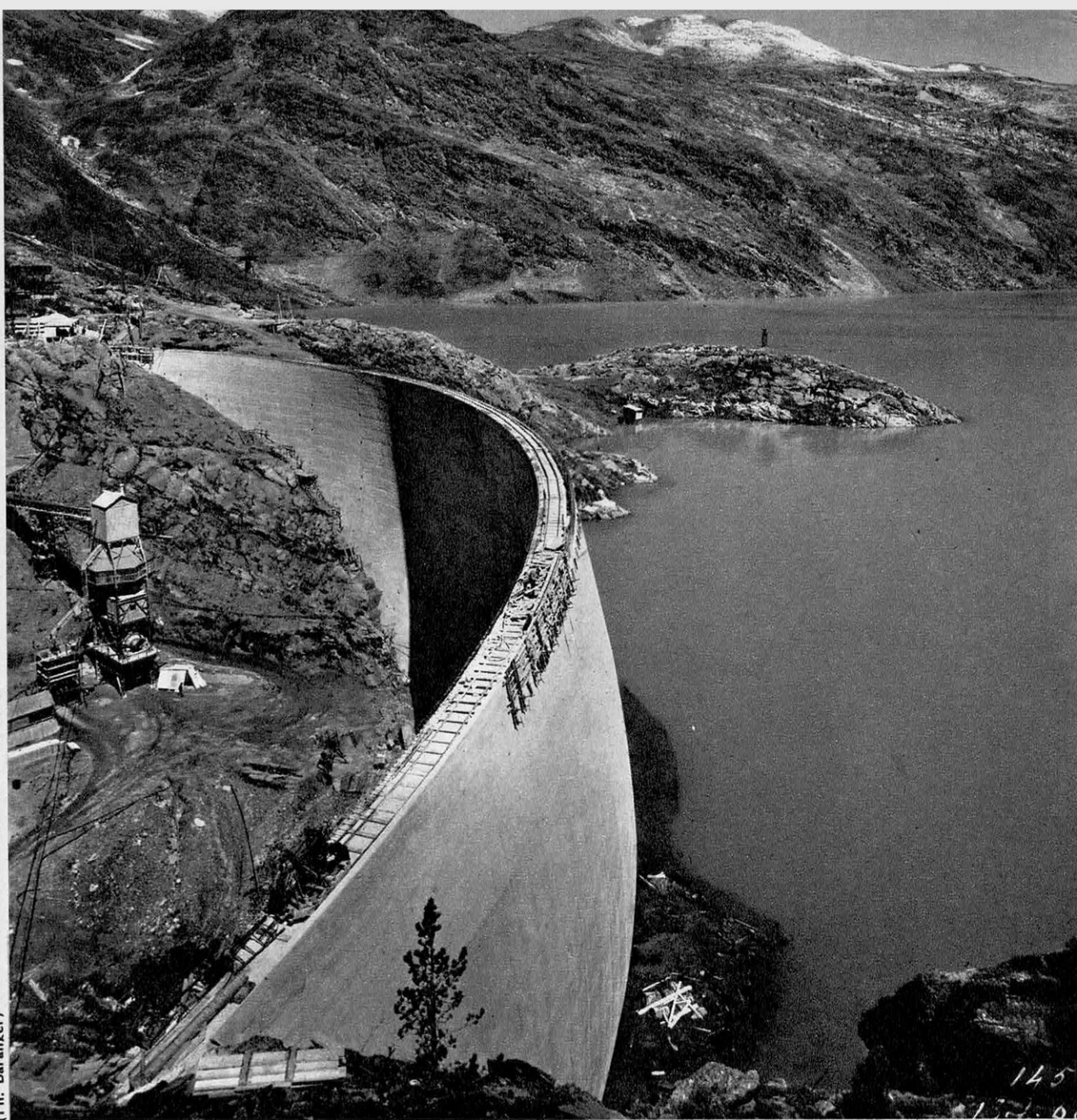
Les usines-barrages constituent le second type fondamental d'aménagement; elles sont constituées par un barrage qui, en remontant le plan d'eau, diminue considérablement la perte de charge de la rivière. L'usine est directement accolée au barrage, faisant quelquefois corps avec lui; les ouvrages d'amenée et de fuite, les conduites forcées sont alors pratiquement inexistantes.

Le barrage de Génissiat sur le Rhône (100 m de hauteur), celui de Bort sur la Dordogne (120 m), celui de Monteynard sur le Drac (155 m) sont des exemples caractéristiques de ce genre d'aménagement. A côté de ces ouvrages-barrages de grande hauteur, ce type comprend également des usines-barrages en rivière pour lesquelles la hauteur de chute n'atteint que quelques mètres (St-Hilaire-sur-l'Isère).

S'il existe un certain nombre d'aménage-

SUITE PAGE 62



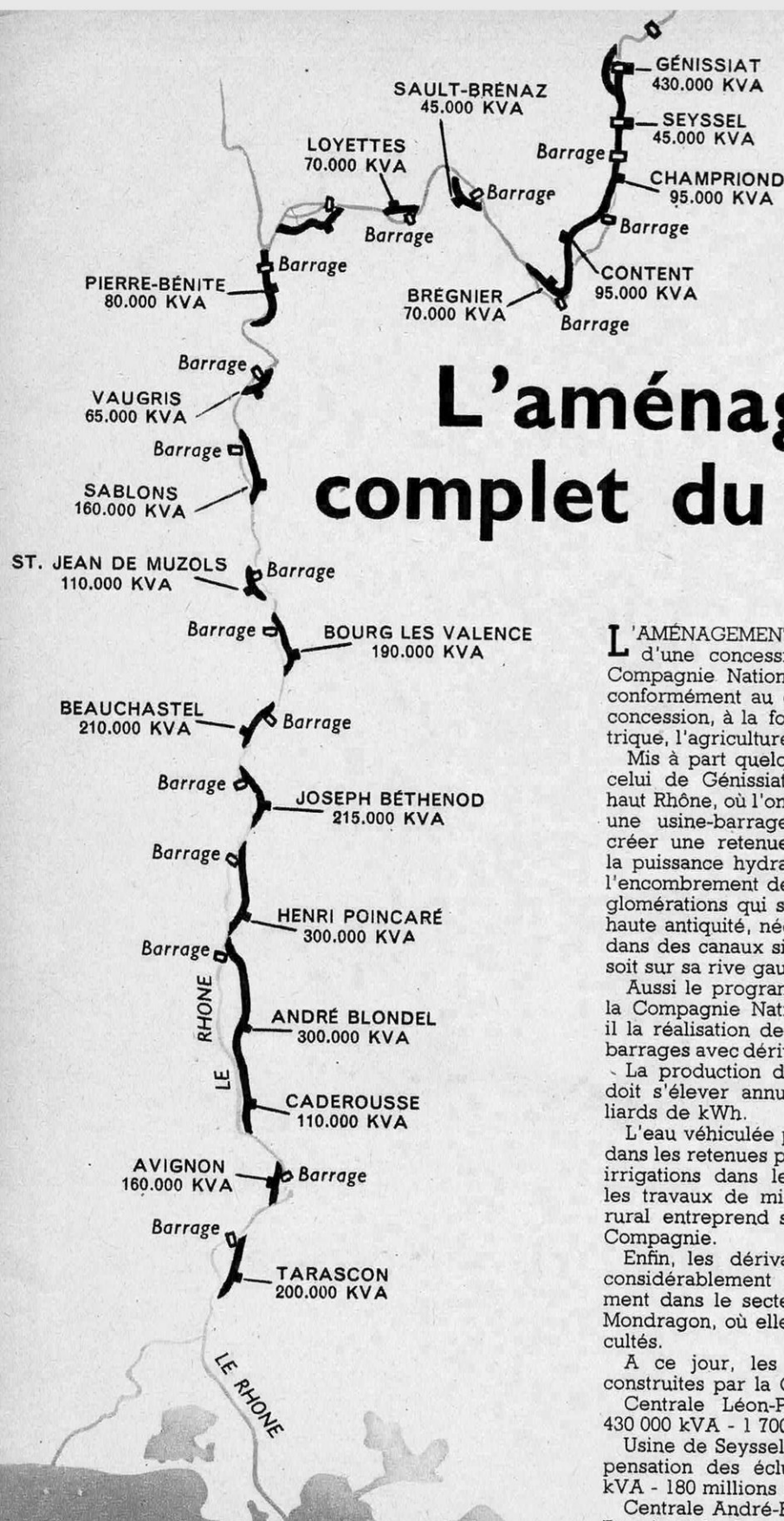


Le barrage en voûte mince du Lanoux, de 45 m de haut et 177 m de longueur de crête

L'aménagement de l'Hospitalet

L'aménagement de Lanoux-l'Hospitalet met en valeur les ressources hydrauliques du haut bassin de l'Ariège en exploitant les possibilités d'accumulation exceptionnelles de la cuvette de l'étang de Lanoux, situé dans la haute vallée du Carol. Le réservoir de Lanoux, d'une capacité utile de 70 millions de m³ à la cote 2 200 environ, est directement relié par une galerie en charge et une conduite forcée à l'usine de l'Hospitalet (cote 1 430) et alimente ses trois turbines « haute chute ». D'autre part, un ensemble de prises d'eau et de réservoirs secondaires rassemble les eaux

des affluents rive droite et gauche de l'Ariège et les dirige par deux conduites forcées vers un collecteur commun d'où elles peuvent, soit être turbinées par une turbine « basse chute », soit être refoulées par pompage dans le réservoir de Lanoux suivant qu'on se trouve en période de faible ou de forte hydraulité, l'usine de l'Hospitalet fonctionnant comme centrale de pointe. Enfin, une galerie relie l'Ariège au Carol pour restituer dans cette rivière les eaux détournées vers l'Ariège de manière que les riverains du versant espagnol ne soient aucunement lésés.



L'aménagement complet du Rhône

L'AMÉNAGEMENT du Rhône a fait l'objet d'une concession originale accordée à la Compagnie Nationale du Rhône, et intéresse, conformément au cahier des charges de cette concession, à la fois la production hydroélectrique, l'agriculture et la navigation.

Mis à part quelques cas particuliers, comme celui de Génissiat, situé dans les gorges du haut Rhône, où l'on pouvait facilement implanter une usine-barrage en travers du fleuve et créer une retenue importante, l'utilisation de la puissance hydraulique du Rhône, du fait de l'encombrement de sa vallée, des diverses agglomérations qui s'y sont fixées depuis la plus haute antiquité, nécessitait de dériver le fleuve dans des canaux situés, soit sur sa rive droite, soit sur sa rive gauche.

Aussi le programme général mis au point par la Compagnie Nationale du Rhône comprend-il la réalisation de 3 usines-barrages et de 15 barrages avec dérivation alimentant 16 centrales. La production de l'ensemble de ces usines doit s'élever annuellement à environ 14 milliards de kWh.

L'eau véhiculée par les canaux ou accumulée dans les retenues permet le développement des irrigations dans les plaines du bas Rhône et les travaux de mise en valeur que le Génie rural entreprend sur concours financier de la Compagnie.

Enfin, les dérivations canalisées améliorent considérablement la navigation, particulièrement dans le secteur compris entre l'Isère et Mondragon, où elle rencontrait le plus de difficultés.

A ce jour, les centrales hydroélectriques construites par la Compagnie sont :

Centrale Léon-Perrier de Génissiat : 430 000 kVA - 1 700 millions de kWh/an.

Usine de Seyssel accolée au barrage de compensation des éclusées de Génissiat : 45 000 kVA - 180 millions de kWh/an.

Centrale André-Blondel, sur la dérivation de Donzère-Mondragon : 300 000 kVA - 2 000 millions de kWh/an.



La salle des turbines de l'usine Henri-Poincaré sur la dérivation de Montélimar

Centrale Henri-Poincaré, sur la dérivation de Montélimar : 300 000 kVA - 1 670 millions de kWh/an.

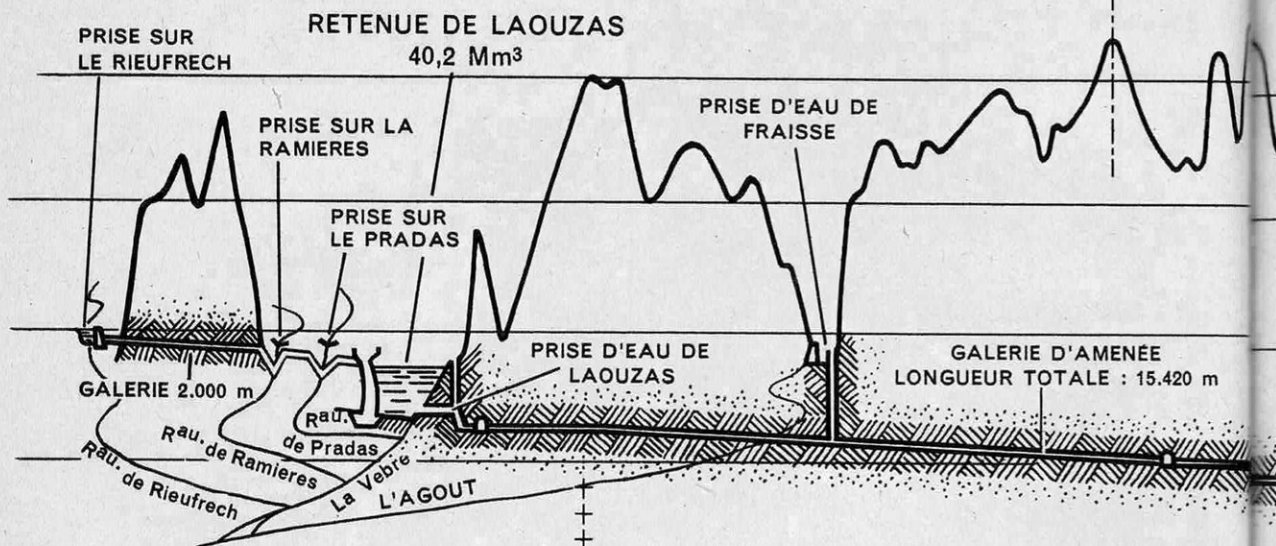
Centrale Joseph-Béthenod, sur la dérivation de Baix-le-Logis Neuf : 215 000 kVA - 1 195 millions de kWh/an.

Leur production totale annuelle atteint ainsi 6,7 milliards de kWh en année moyenne, soit 9,3 % de la production d'énergie électrique française ou 16,7 % de la production d'origine hydraulique.

L'aménagement du Rhône est poursuivi de façon continue. Actuellement, le 4^e des 5 équi-

pements par grande dérivation prévus entre l'Isère et Mondragon, celui de Beauchastel, (1 190 millions de kWh/an) est en chantier et il doit entrer en service en 1964.

Restera, pour compléter l'aménagement de ce secteur, à équiper la chute de Bourg-les-Valence. Parmi les aménagements projetés, celui de Pierre-Bénite, aux portes de Lyon, a été retenu par le Commissariat Général au Plan en raison de son intérêt pour la navigation et la liaison Rhône-Rhin, ainsi que pour le développement économique du « sillon rhodanien ». Sa réalisation est prévue de 1962 à 1966.



ments conformes à ces deux schémas fondamentaux, la plupart sont beaucoup plus complexes.

On peut avoir la combinaison d'un barrage et d'une dérivation (Roselend).

Lorsque les apports d'un cours d'eau sont trop faibles pour justifier un aménagement propre, une galerie peut collecter les eaux de plusieurs rivières pour les rassembler avant de les turbiner dans une usine. Pour valoriser l'énergie produite, on peut installer, en dérivation ou en série sur cette galerie, un réservoir de plus ou moins grande importance (Aussois rassemblant les apports de rive droite de l'Arc supérieur avec la retenue de Plan d'Aval, Pragnères dans la haute vallée du Gave de Pau avec le réservoir de Cap-de-Long).

Selon le même principe, il peut aussi être intéressant d'augmenter les apports naturels d'un réservoir par l'adduction d'autres cours d'eau : les adductions amont du barrage de Roselend conduisent dans la retenue les eaux des torrents de la rive droite de l'Isère.

L'eau peut aussi être turbinée, non entre deux points d'un même cours d'eau, mais entre deux points de cours d'eau distincts, qui, quoique voisins géographiquement, coulent à des altitudes différentes : l'aménagement de Randens restitue dans l'Arc le débit de l'Isère dérivé à l'aval de Moutiers-Salins.

Quelquefois même, il est intéressant de faire passer l'eau d'un bassin versant à l'autre : ainsi, dans les Cévennes, le versant atlantique nord-ouest est relativement arrosé mais a une pente faible, tandis que le versant médi-

terrane est très abrupt, d'où les aménagements de Montpezat et de Montahut qui conduisent sur le versant méditerranéen les eaux du versant atlantique.

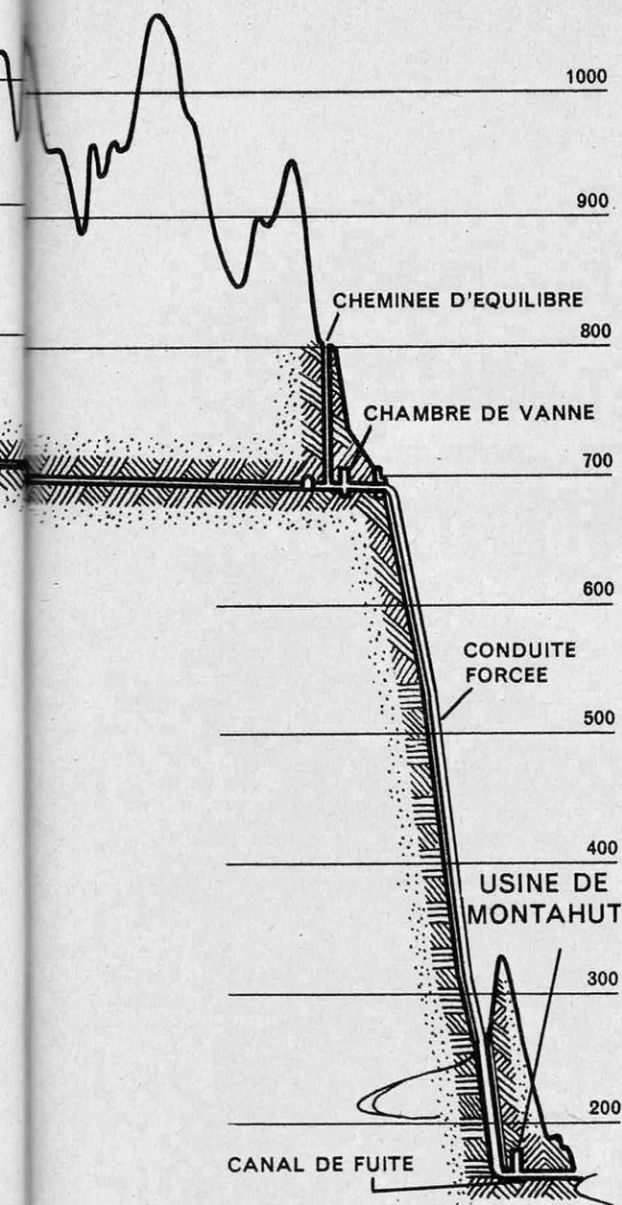
Le débit d'équipement

Si les ouvrages permettent de créer la hauteur de chute disponible, le débit d'eau conditionne également la puissance et la production de l'installation.

Mais les débits des cours d'eau sont variables au cours de l'année et même au cours de la journée. Cette variation est fonction de l'étendue du bassin versant, de ses caractéristiques d'écoulement (pente et perméabilité du sol, présence de lacs ou de glaciers), du climat, de ses différentes orientations, de l'altitude, des précipitations et conditions atmosphériques.

Pour chaque aménagement, il convient donc de choisir le débit d'équipement auquel sont ensuite adaptées les dimensions des ouvrages d'amenée et de fuite et les caractéristiques de la ou des turbines. Au fil de l'eau, c'est-à-dire sans réservoir, il n'est pas intéressant d'installer un groupe qui ne peut fonctionner que quelques jours par an ; par ailleurs, ne prévoir un aménagement que pour le débit d'étiage conduit à un gaspillage considérable d'énergie possible, en laissant en rivière un très grand volume d'eau. De plus, il est indispensable de pouvoir utiliser l'énergie produite : le choix du débit d'équipement d'un aménagement au fil de l'eau, par rapport au débit moyen de la rivière, a

← L'aménagement de l'Agout



donc évolué avec les modifications des réseaux électriques.

Les premiers grands aménagements hydro-électriques ont été faits, soit pour des usines électrométallurgiques, soit pour des réseaux de distribution locaux. Dans le premier cas, toute l'installation hydraulique et métallurgique devait correspondre à la même puissance : donc, seuls étaient intéressants les équipements d'une grande durée d'utilisation. Dans le second, la puissance de production devait être adaptée à la consommation du réseau ou, inversement, les dimensions du

A la limite des départements du Tarn et de l'Hérault, les bassins de l'Agout et de son affluent la Vèbre permettent la création d'un important réservoir de stockage à peu de distance du versant abrupt par lequel l'Espinouse domine la plaine du littoral méditerranéen. Les possibilités énergétiques ainsi offertes sont exploitées en captant ces eaux du versant atlantique par le réservoir de Laouzas et en les restituant sur le versant méditerranéen dans le Jaur, affluent de l'Orb. Une dérivation souterraine de 16 km fournit une chute d'environ 600 m qui correspond, aux bornes de la centrale souterraine de Montahut, à une puissance de 100 000 kW et une production annuelle moyenne qui sera de l'ordre de 235 millions de kWh.

réseau à la possibilité de production; et pour parer aux déficiences des moyens hydrauliques, il fallait une autre source d'énergie pour éviter des coupures. En conséquence, dans les deux cas, le débit équipé du cours d'eau devait être assuré pendant une partie importante de l'année.

Maintenant, au contraire, l'interconnexion du réseau français et même du réseau européen est totale; la période de faible débit d'une région peut correspondre à une période de fort débit d'une autre dont le régime est différent, et toute production hydraulique permet d'économiser du combustible dans les usines thermiques.

La mise en évidence de l'évolution du débit d'équipement par rapport au débit moyen de la rivière est marquée par la multiplication des réservoirs de régularisation; mais un exemple assez caractéristique paraît être celui de l'aménagement du Rhin entre Bâle et Strasbourg.

A son entrée en France, le débit semi-permanent du Rhin (débit dépassé la moitié de l'année) est de 1 030 m³/s environ. La première concession du Grand Canal d'Alsace, celle de Kembs en 1927, à une époque où il n'existait pas d'interconnexion d'ensemble du réseau électrique français, prévoyait l'équipement d'un débit de 850 m³/s (atteint en moyenne 230 jours par an environ). Lorsque la construction du Grand Canal d'Alsace a été reprise, en 1947, pour le bief d'Ottmarsheim, le débit de la concession a été porté à 1 080 m³/s : le fonctionnement à ce régime peut être assuré environ 155 jours par an. En 1956, au moment des négociations pour

le nouveau schéma d'aménagement, le débit d'équipement des nouvelles usines a été fixé à 1 400 m³/s, disponible en moyenne 90 jours par an environ.

Réservoirs de régularisation

Mais la limite, quelle qu'elle soit, du débit d'équipement au fil de l'eau, correspond à l'abandon du débit excédentaire qui est déversé, donc à un gaspillage d'énergie, alors qu'en basses eaux l'aménagement n'est pas utilisé à sa pleine puissance. Il est donc intéressant de stocker les excédents d'eaux pour les restituer en période d'étiage; mais à l'irrégularité du débit des cours d'eau s'a-

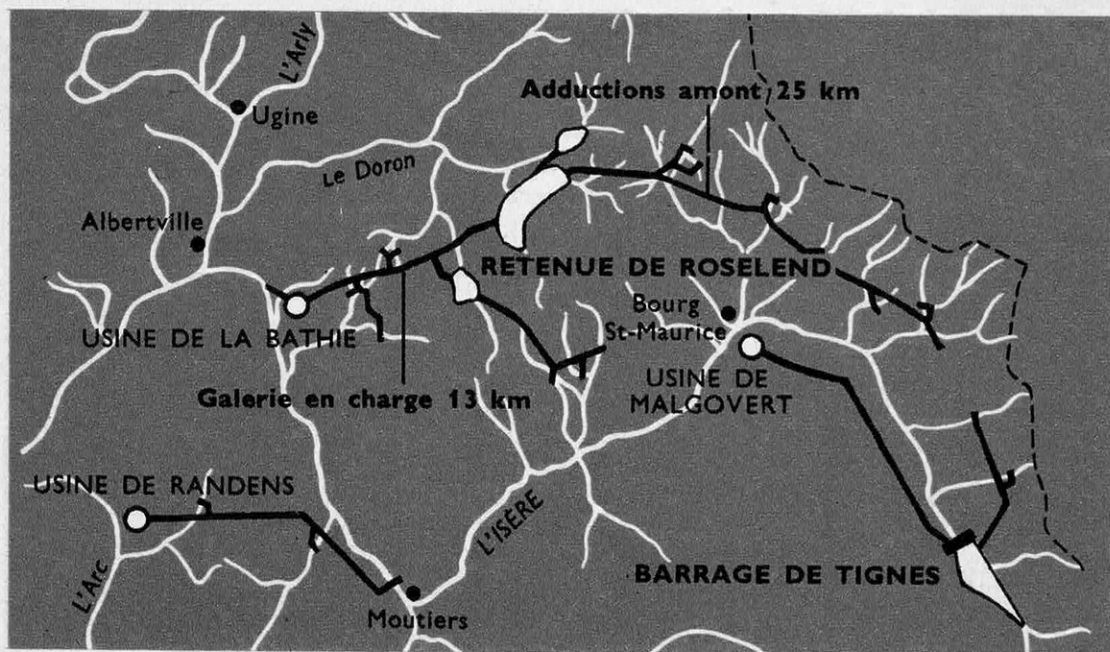
joute une irrégularité de la consommation d'énergie: les grandes retenues permettent de reporter sur les périodes de forte consommation des apports des autres saisons (Tignes et Roselend sur l'Isère, le Lanoux et le Portillon dans les Pyrénées, Bort sur la Dordogne, Serre-Ponçon sur la Durance).

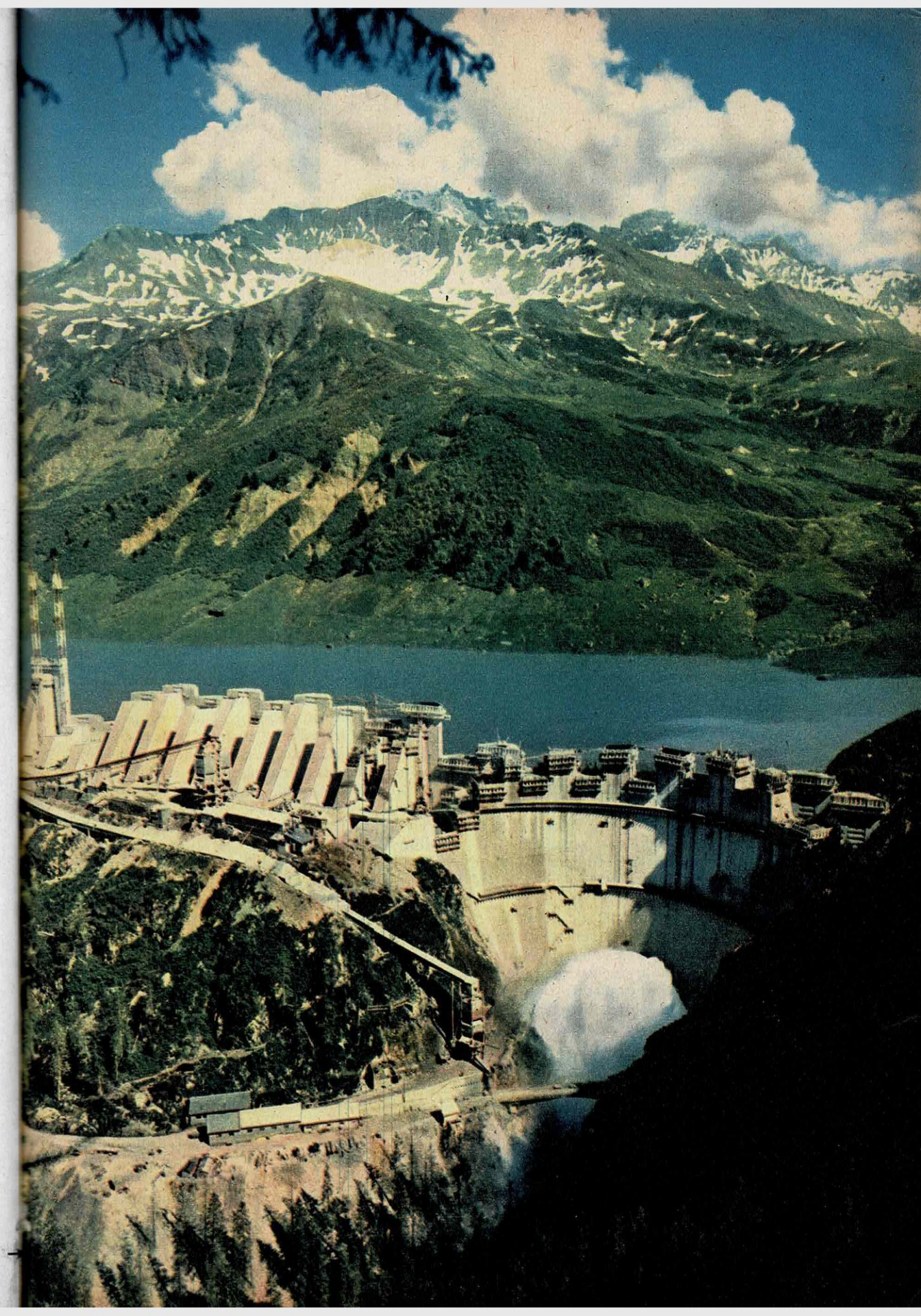
Les usines de pied de grands réservoirs servent aussi pour adapter la production aux variations instantanées des besoins; ainsi l'usine de la Bathie-Roselend peut prendre en trois minutes sa puissance totale de 500 000 kW pour permettre le passage de pointes de consommation; mais pour une régularisation journalière ou hebdomadaire, des petits volumes qui permettent d'utiliser, pendant les

Aménagement de la Haute-Isère

UNE des pièces maîtresses de l'équipement du bassin est l'aménagement de Roselend avec ses 200 millions de m³ de réserves nouvelles. Le réservoir le plus important est constitué par le barrage de Roselend, haut de 150 m au-dessus de ses fondations, avec un développement en crête de 804 m et un volume de béton de 900 000 m³. Outre deux réservoirs supplémentaires à la Gittaz et à St-Guérin, deux galeries, l'une de 25 km, l'autre de 8 km, ramènent dans la retenue les eaux des torrents de rive droite de l'Isère pour augmenter le volume des apports. La liaison avec l'usine de la Bathie se fait par une galerie en charge de 13 km de

long et 4,20 m de diamètre. L'usine est entièrement creusée dans le rocher, l'excavation mesurant 130 m de long, 25 m de large, 32 m de haut, et est équipée de 6 groupes pour, au total, 50 m³/s sous 1 200 m de chute brute. C'est la plus puissante usine hydraulique de France (500 000 kW). Sa production moyenne annuelle est d'un milliard de kWh, fournie en grande partie pendant les heures pleines d'hiver. L'intérêt fondamental de l'aménagement résulte surtout du fait qu'il peut, à tout instant, fournir au réseau général de distribution 500 000 kW de puissance, trois minutes et demie seulement après réception de l'ordre de démarrage.





heures pleines de jour, une partie des apports des heures creuses de nuit sont suffisants et valorisent considérablement l'ensemble d'un aménagement. Ces volumes utiles se prélèvent soit sur la hauteur accumulée dans le cas d'une usine-barrage (Chastang sur la Dordogne, Génissiat sur le Rhône), soit sur une retenue placée à l'amont dans le cas d'une usine-dérivation (Oraison sur la Durance).

Le parc français d'installations hydrauliques est partagé en trois types d'aménagements, d'après la possibilité de report du débit naturel à une période plus favorable: les usines de lacs, les usines d'éclusées, les usines au fil de l'eau.

L'étude préalable d'un aménagement hydraulique

La détermination des caractéristiques d'un aménagement hydraulique est le fruit d'une très longue étude.

Il convient d'abord de bien connaître les conditions de base topographiques, géologiques et hydrologiques: relevés, mesures et reconnaissances se succèdent pendant des années. Pour l'hydrologie, en particulier, étant donné la grande variation des débits, il faut de nombreuses années de relevés pour connaître avec une précision suffisante les apports qui détermineront la possibilité de production de l'aménagement.

Il faut aussi choisir le type d'ouvrage: il arrive que des données géographiques, géologiques ou humaines imposent le choix d'équipement: par exemple l'aménagement du Rhône inférieur n'aurait probablement pas été traité en dérivation si la vallée n'avait pas été aussi peuplée. Mais ce n'est pas toujours le cas: pour Génissiat, plusieurs solutions de dérivation ont été étudiées en même temps que la solution usine-barrage qui a été finalement retenue.

Indépendamment du type de l'aménagement, il faut étudier son dimensionnement: un réservoir plus grand régularise mieux le débit d'une rivière, une dérivation plus importante autorise une augmentation du débit turbiné ou réduit les pertes de charge gaspillées, mais au prix évidemment d'une augmentation d'investissements.

Tous ces problèmes sont extrêmement complexes, car ils sont liés entre eux et font intervenir des considérations de production en quantité et qualité (énergie d'heures creuses, d'heures pleines, d'heures de pointes) et de prix (prix d'installation, prix d'exploitation, prix de l'énergie).

Dans notre pays, Électricité de France

a la charge de prévoir les moyens de production destinés à satisfaire à l'augmentation de consommation électrique aux meilleures conditions: il lui faut donc non seulement rechercher les aménagements possibles et fixer leurs caractéristiques optimales, mais aussi les classer du point de vue économique. Pour cette raison Électricité de France emploie une méthode originale: d'une part, toutes les dépenses d'investissements et d'exploitations d'un aménagement hydraulique étudié sont actualisées à l'origine; d'autre part, l'ensemble est comparé au coût également actualisé de l'aménagement thermique classique moderne au charbon qui, mis en service à la même date, produirait la même énergie, en quantité et qualité, que l'aménagement hydraulique étudié.

On en déduit ainsi le coefficient de valeur ou la rentabilité annuelle du supplément de dépenses qu'exige l'équipement hydraulique. Si ce coefficient de valeur est plus grand que 1 ou si le coefficient de rentabilité est supérieur au taux du marché financier, l'opération hydraulique est intéressante et, parmi les diverses variantes, on choisit celle qui correspond à l'enrichissement maximum.

Navigation, irrigation, protection contre les crues

L'équipement hydroélectrique d'une rivière utilise l'eau, mais ne la consomme pas: l'énergie est simplement récupérée par une turbine au lieu d'être gaspillée dans la rivière. Après équipement, l'eau peut servir aux mêmes usages qu'auparavant et elle reste disponible pour de nouvelles utilisations. L'équipement hydroélectrique peut donc être lié à des aménagements à buts multiples dont il assure ou facilite la rentabilité: création de biefs navigables sur un cours d'eau (équipement du Rhône, canalisation de la Moselle), constitution de réservoirs pour l'irrigation (Serre-Ponçon sur la Durance), ou protection contre les crues (Pannessière, sur l'Yonne).

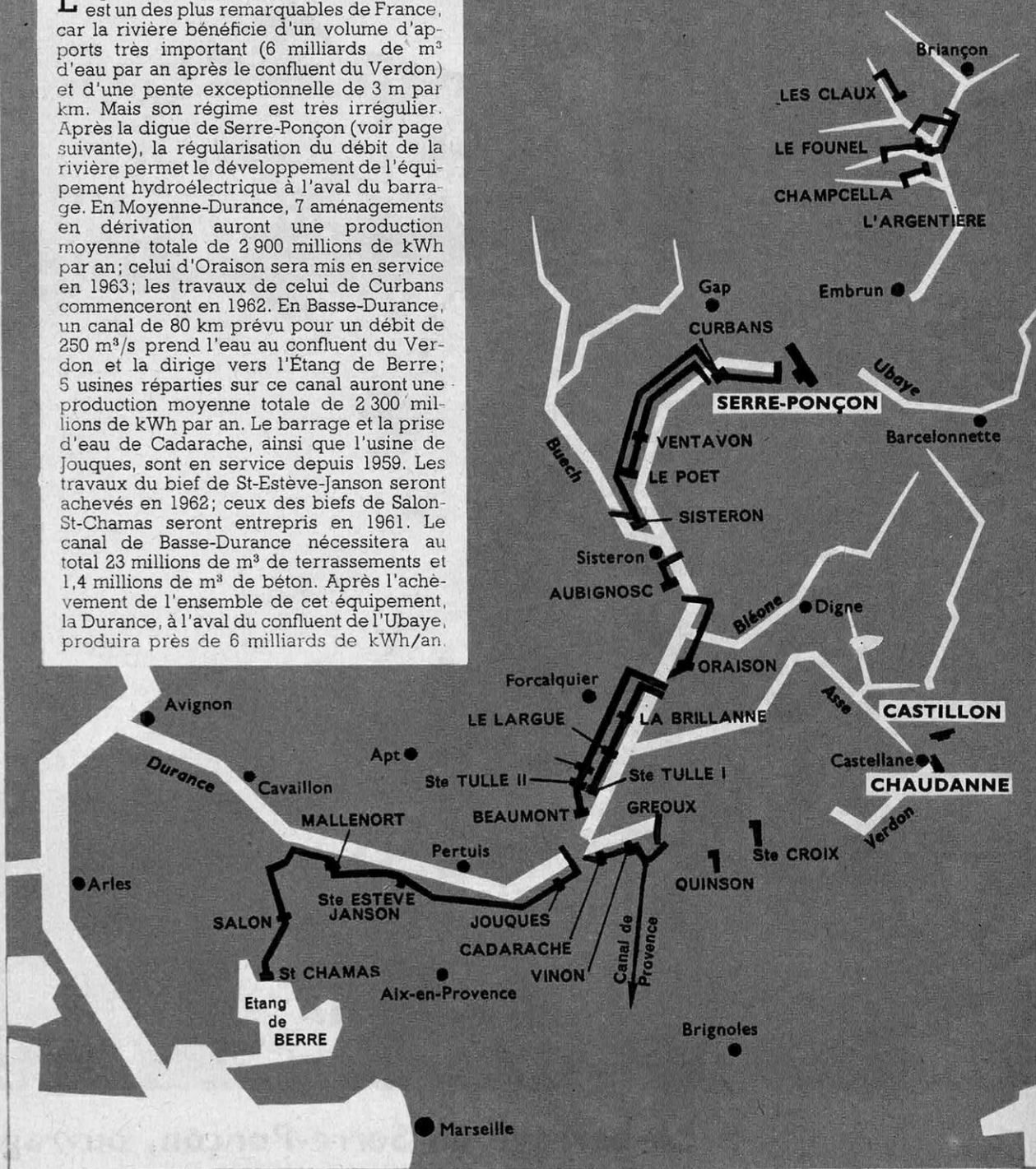
Le potentiel « sauvage »

L'eau est un don gratuit du ciel qu'il suffit en somme de récolter et qui est renouvelé d'année en année: il n'y a donc pas de gisement susceptible de s'épuiser comme cela se produit pour le charbon, le pétrole ou les minerais, mais un potentiel qui, tous les ans, aux irrégularités de débits près, donne la même production.

Toutefois, l'énergie hydraulique a une limite théorique: c'est celle où tout filet

Aménagement de la Durance

Le potentiel hydraulique de la Durance est un des plus remarquables de France, car la rivière bénéficie d'un volume d'apports très important (6 milliards de m³ d'eau par an après le confluent du Verdon) et d'une pente exceptionnelle de 3 m par km. Mais son régime est très irrégulier. Après la digue de Serre-Ponçon (voir page suivante), la régularisation du débit de la rivière permet le développement de l'équipement hydroélectrique à l'aval du barrage. En Moyenne-Durance, 7 aménagements en dérivation auront une production moyenne totale de 2 900 millions de kWh par an; celui d'Oraison sera mis en service en 1963; les travaux de celui de Curbans commenceront en 1962. En Basse-Durance, un canal de 80 km prévu pour un débit de 250 m³/s prend l'eau au confluent du Verdon et la dirige vers l'Étang de Berre; 5 usines réparties sur ce canal auront une production moyenne totale de 2 300 millions de kWh par an. Le barrage et la prise d'eau de Cadarache, ainsi que l'usine de Jouques, sont en service depuis 1959. Les travaux du bief de St-Estève-Janson seront achevés en 1962; ceux des biefs de Salon-St-Chamas seront entrepris en 1961. Le canal de Basse-Durance nécessitera au total 23 millions de m³ de terrassements et 1,4 millions de m³ de béton. Après l'achèvement de l'ensemble de cet équipement, la Durance, à l'aval du confluent de l'Ubaye, produira près de 6 milliards de kWh/an.

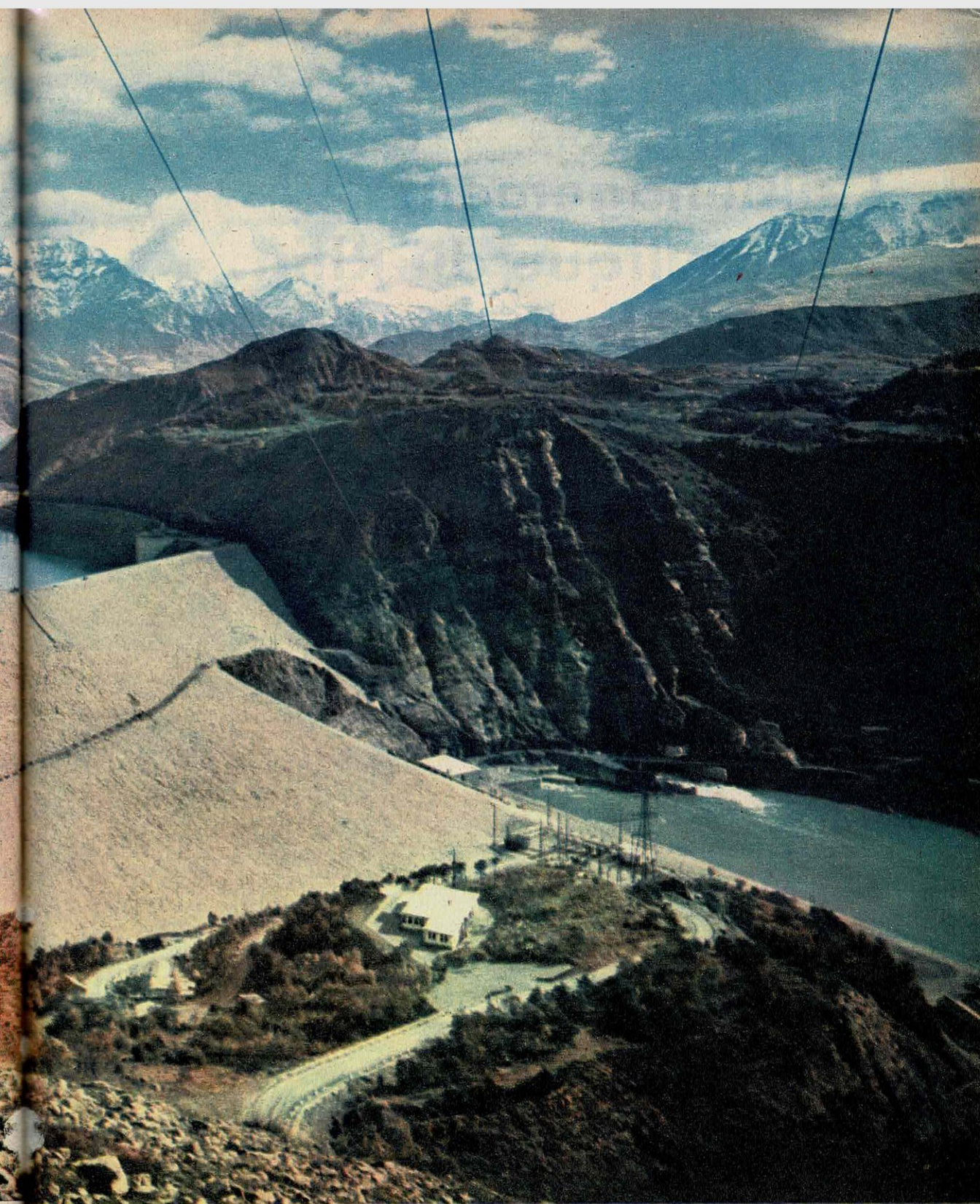


VOIR PAGE SUIVANTE →



Le barrage de Serre-Ponçon, ouvrage-

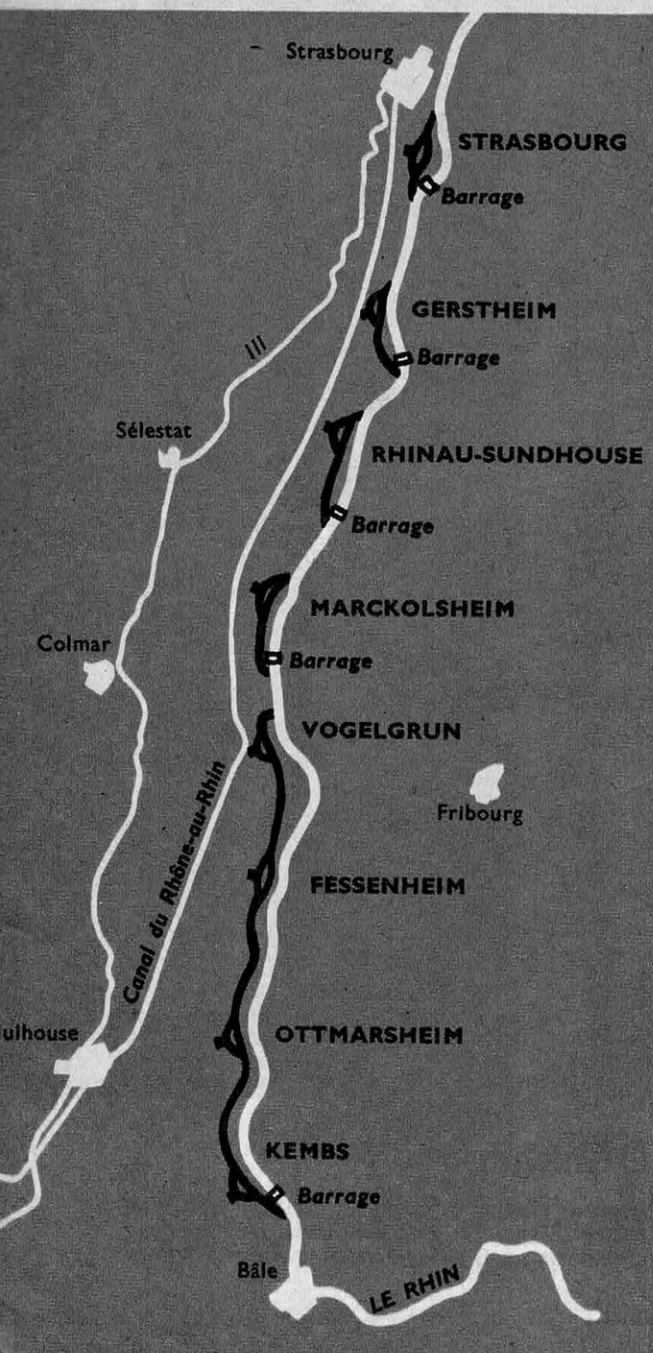
La digue de Serre-Ponçon, construite entre 1955 et 1960, crée un lac de 2 900 hectares d'une capacité de 1 200 millions de m³, dont 900 millions de m³ utiles, vis-à-vis d'un volume moyen d'apports de 2 700 millions de m³. Cette digue a une hauteur de 127,5 m, une épaisseur à la base de 600 m, un



e- clé de l'aménagement de la Durance

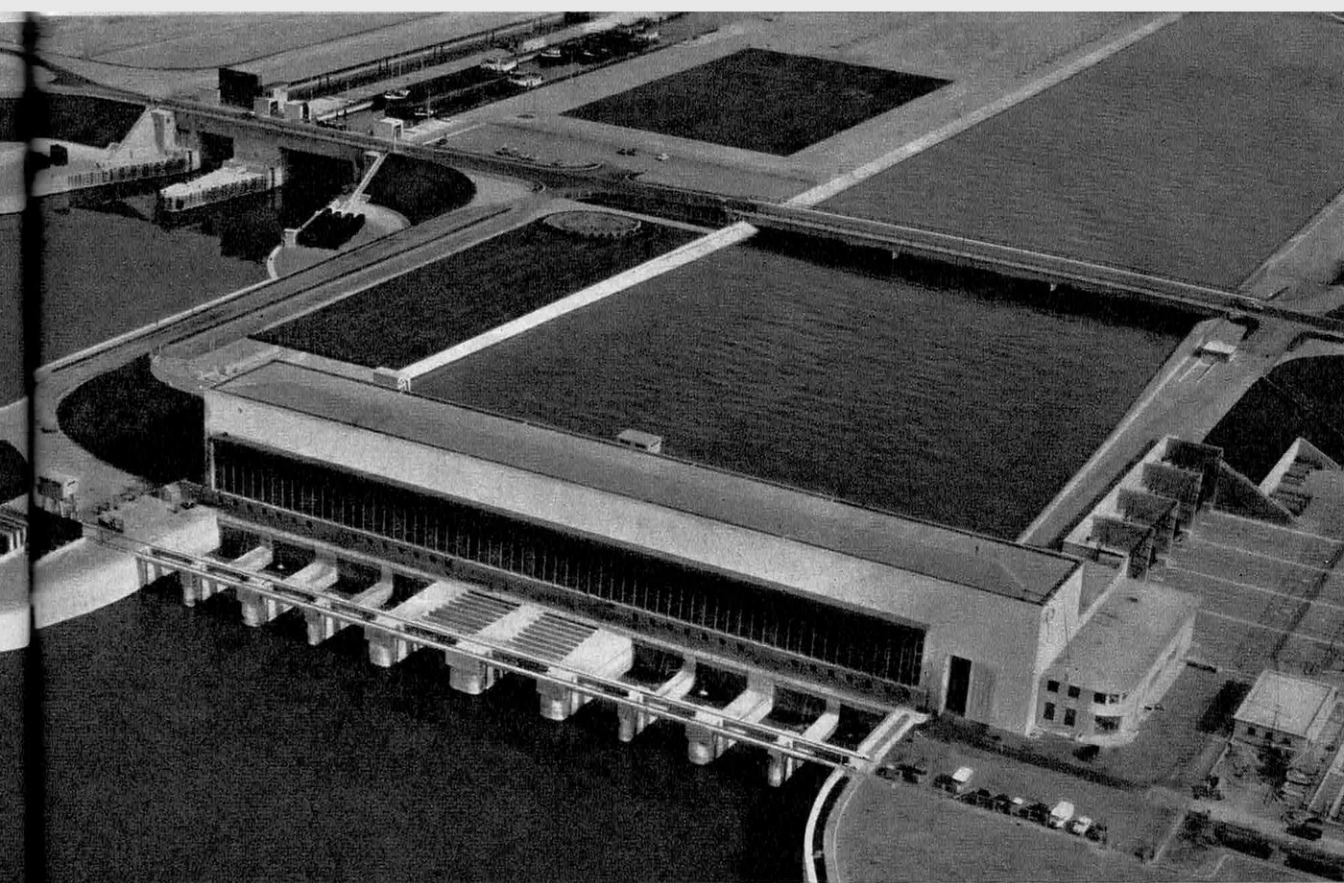
volume de 14 millions de m³. L'usine souterraine est équipée de quatre groupes, dont les deux premiers ont été mis en service en 1960. La retenue régularise l'irrigation de 75 000 hectares tributaires des débits irréguliers de la rivière et permet son extension à 22 000 hectares supplémentaires.

L'aménagement hydraulique du Rhin entre Bâle et Strasbourg



ENTRE Bâle et Strasbourg, sur une distance de 127 km, la différence de niveau du Rhin est de 107 m et le débit moyen du fleuve de $1\,060\text{ m}^3/\text{s}$; l'aménagement hydro-électrique de cette partie du fleuve produira en année moyenne 6,7 milliards de kWh. L'aménagement d'ensemble devait comprendre huit usines réparties sur un canal de $1\,200\text{ m}^2$ de section environ, parallèle au fleuve et alimenté par un barrage unique à Kembs. Les quatre premières usines furent mises en service en 1932, 1952, 1957, 1959; le débit nominal de la dérivation est de $1\,080\text{ m}^3/\text{s}$. Mais, en 1956, les accords franco-allemands ont modifié le schéma. Chaque aménagement comprendra un barrage mobile placé sur le fleuve, sensiblement à mi-distance entre les deux usines et relevant le niveau d'eau de 6 à 8 m; les dérivation auront une dizaine de kilomètres de longueur, avec une section courante de $1\,300\text{ m}^2$ environ; il y aura enfin une usine-écluse, l'usine étant équipée pour un débit de $1\,400\text{ m}^3/\text{s}$. Pour permettre la navigation, dont le trafic a atteint 7 millions de tonnes en 1960, avec une moyenne d'une centaine de bateaux par jour, deux écluses de 184 m de long et respectivement 12 et 23 m de largeur sont accolées à chaque usine. Le bief de Marckolsheim, mis en eau en septembre 1960 et dont les groupes seront mis en service en 1961, a été construit selon ce schéma. Il en sera de même de l'aménagement de Rhinau dont les travaux ont commencé en 1960. La chute de Vogelgrun, mise en service en 1959, a marqué au contraire l'achèvement de la première partie de l'aménagement du Rhin entre Bâle et Vieux-Brisach, où se termine le Grand Canal d'Alsace; la production annuelle moyenne est de 720 millions de kWh fournis par 4 groupes verticaux de 39 000 kVA comportant des turbines du type Kaplan de près de 7 m de diamètre.

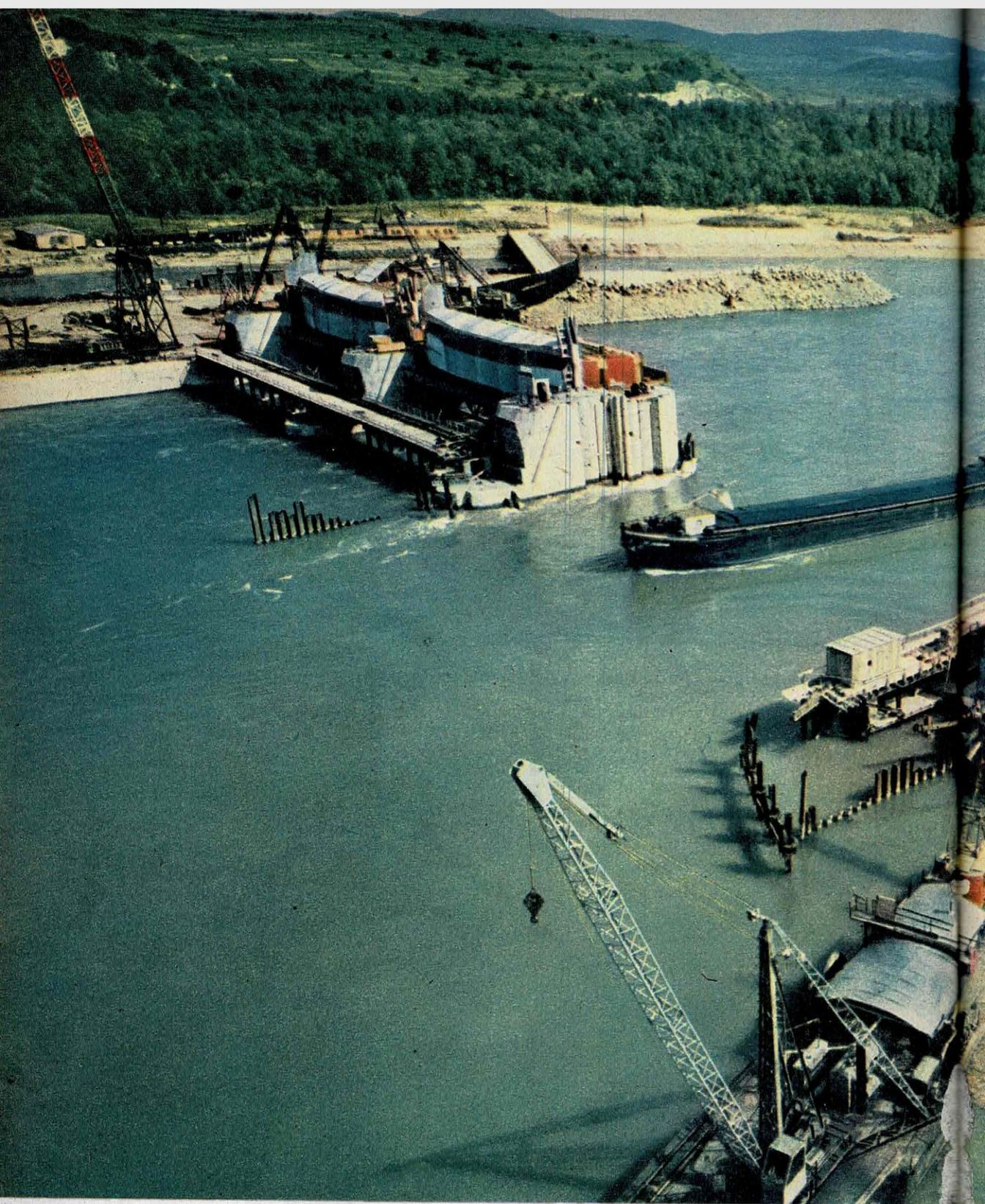
L'usinet



in et les écluses de Vogelgrun et, ci-dessous, le chantier du barrage et du canal de Marckolsheim.

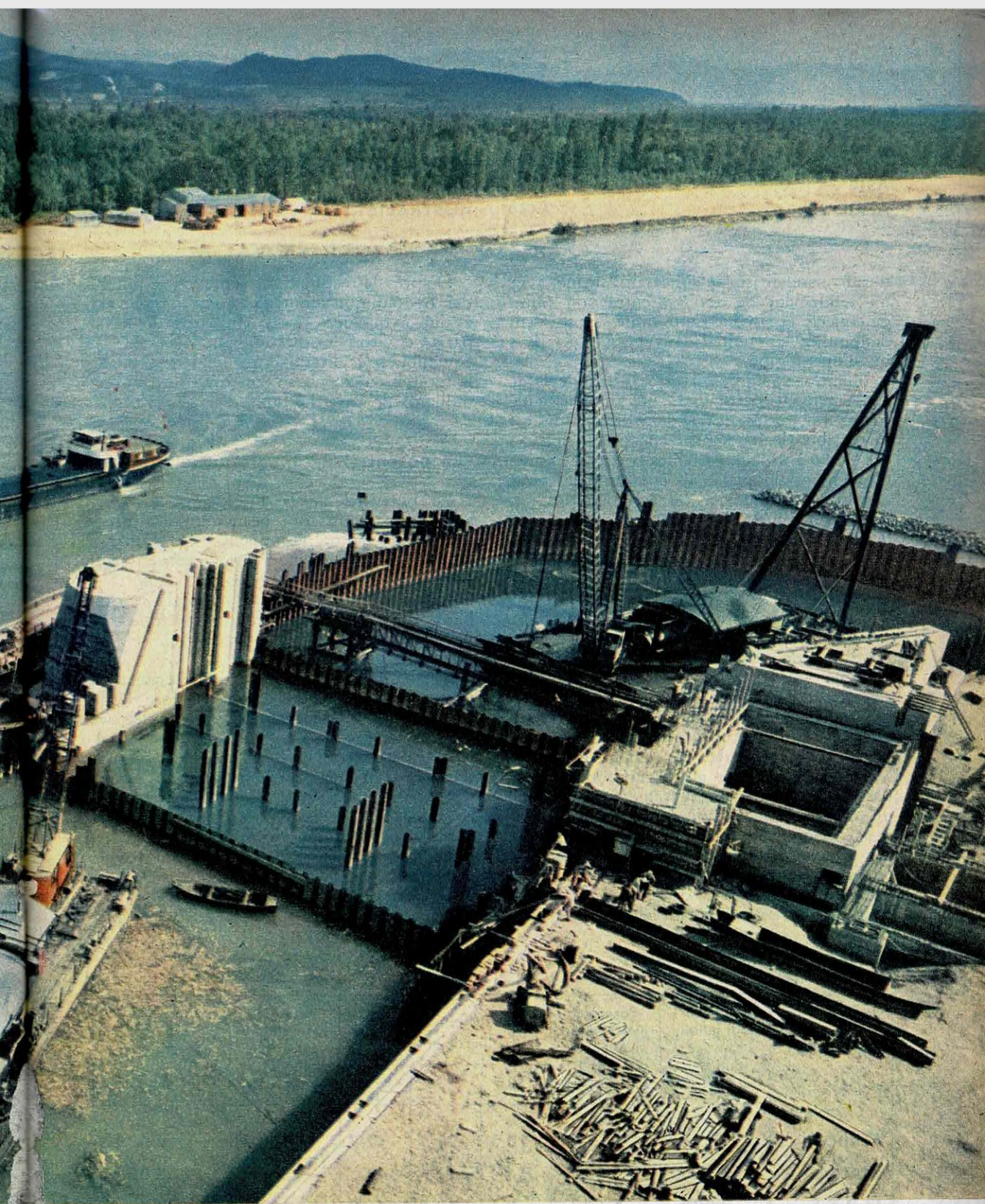


VOIR PAGE SUIVANTE ➔



Le barrage de l'aménagement

C'est le premier barrage construit suivant le nouveau schéma, avec retour au fleuve des eaux du canal de dérivation sur lequel se trouvent l'usine et les écluses. Le barrage, implanté dans le lit du Rhin, comportera 5 passes de 30 m de largeur séparées par des piles de 7 m d'épaisseur. Au moment



Le Marckolsheim sur le Rhin

où la photographie a été prise, seules les passes sur la rive droite étaient terminées ainsi que les piles rive gauche. Il restait à construire une pile et trois vannes. Chaque « vanne-wagon » permet le passage des eaux par déversement sur la vanne supérieure et par écoulement sous la vanne inférieure.

Potentiel hydraulique sauvage en milliards de kWh/an

EUROPE	2 100	AMÉRIQUE DU NORD	6 150
ASIE	11 750	AMÉRIQUE DU SUD	5 250
AFRIQUE	6 150	AUSTRALIE	1 500

d'eau ruisselant sur le sol serait turbiné, avec un rendement de 100 %, entre son point de collecte et la mer. Cette limite est souvent dénommée « potentiel sauvage » d'un pays ou d'une région.

Même en supposant que, dans chaque aménagement particulier, on aurait annulé toutes les pertes de rendement, ce qui est impossible (le rendement effectif est de l'ordre de 80 à 85 %), certaines parties de cours d'eau ne pourront jamais être équipées pour des raisons humaines ou économiques, et, même sur les rivières aménagées, il est évident qu'il ne sera pas possible d'utiliser la totalité du débit.

Il existe donc une autre limite, cette fois sur le plan pratique, que l'on désigne sous le nom de « potentiel équipable ».

Cette nouvelle limite fait intervenir une condition de prix de revient; elle est donc variable en fonction des circonstances: abondance des autres sources d'énergie, coût des travaux, taux d'intérêt du marché financier. Ce dernier est important puisque la plus grosse part du prix de revient du kWh hydraulique est due aux intérêts des investissements et aux amortissements. La valeur du « potentiel économiquement équipable » peut donc évoluer dans le temps et n'être pas appréciée de façon identique dans tous les pays, mais cette appréciation est également valable lorsqu'on parle de gisement « exploitable » pour un minéral quelconque.

D'après les estimations actuelles, le potentiel hydraulique « sauvage » du monde est évalué à quelque 33 000 milliards de kWh par an environ et on estime que le « potentiel équipable » serait de l'ordre du tiers ou de la moitié seulement, soit quelque 10 à 15 000 milliards de kWh par an.

Le potentiel équipable de la France

Le potentiel de la France, où les besoins en énergie sont beaucoup plus pressants, a été estimé récemment à 270 milliards de kWh sur lesquels 80 milliards environ seraient « équipables » dans les conditions économiques actuelles. Sur ce total, 42 milliards de kWh, soit la moitié environ, correspondent à des aménagements en service ou en chantier.

Si l'on maintient constantes les cadences actuelles de travaux, la France dispose d'une vingtaine d'années avant d'avoir épuisé ses possibilités.

Au contraire, si on admettait que la fourniture d'énergie électrique doit, pour l'avenir proche comme jusqu'à maintenant, continuer à être assurée pour moitié par les productions thermique et hydraulique, il faudrait, avec la cadence moyenne du doublement de consommation en dix ans, une dizaine d'années pour terminer l'aménagement hydroélectrique possible du pays.

	Potentiel hydraulique sauvage (milliards de kWh/an)	Potentiel hydraulique équipable (milliards de kWh/an)	Production annuelle (milliards de kWh)			Potentiel hydraulique équipable (milliards de kWh/an)	Réserves connues de charbon (millions de tonnes)
			1938	1951	1958		
France	270	80	10,3	21,3	32,3	(a) 32	7 600
États-Unis	1 200	500	34	104	143	200	2 000 000
U.R.S.S.	3 000	1 650	8,1	20,8	46,5	700	1 650 000
Monde	33 000	15 000	150	300	570	6 000	6 000 000

(a) Sur la base de 0,4 t de charbon par kWh.

les centrales thermiques

L'ACCROISSEMENT de la consommation d'énergie électrique est particulièrement important en France, puisqu'il atteint un peu plus de 7% par an. Voici les chiffres de progression depuis 1946 en kilowatt-heures :

24,4 milliards en 1946,
34,4 milliards en 1950,
50,4 milliards en 1955,
72 milliards en 1960,
110 milliards en 1965 (prévisions),
200-240 milliards en 1975 (prévisions).

En ce moment, l'accroissement résulte du développement industriel du pays, pour environ 2%, et de la substitution de l'énergie électrique à des formes d'énergie moins commodes à utiliser, pour environ 5%. On peut citer, par exemple, la suppression d'un grand nombre de moteurs alternatifs à gaz pauvre de l'industrie sidérurgique.

On admet généralement que la consommation a tendance à doubler tous les 10 ans, ce qui correspond à un accroissement de 7,2%.

La situation est sensiblement la même dans la majeure partie des pays étrangers. Aux États-Unis, le rapport des productions globales est de 2,1 entre 1958 et 1948.

Par contre, l'U.R.S.S., dont le développement industriel est actuellement très important, suit sensiblement une loi de doublement

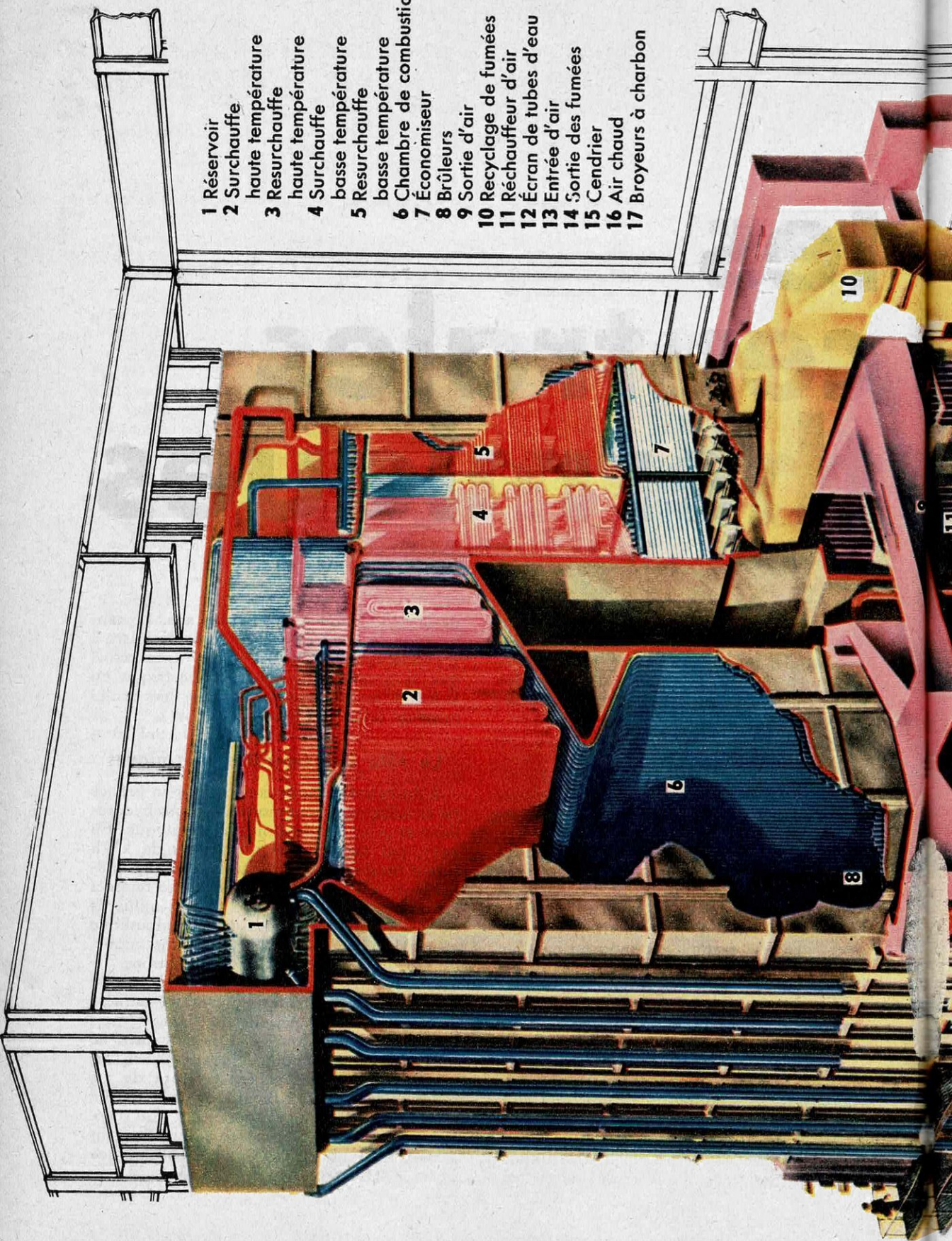
de la production tous les cinq ans. Le rapport est de 2 entre 1953 et 1948 et il passe à 3,5 entre 1958 et 1948. Mentionnons toutefois que la production d'énergie électrique en U.R.S.S. représentait en 1958 le tiers seulement de celles des États-Unis.

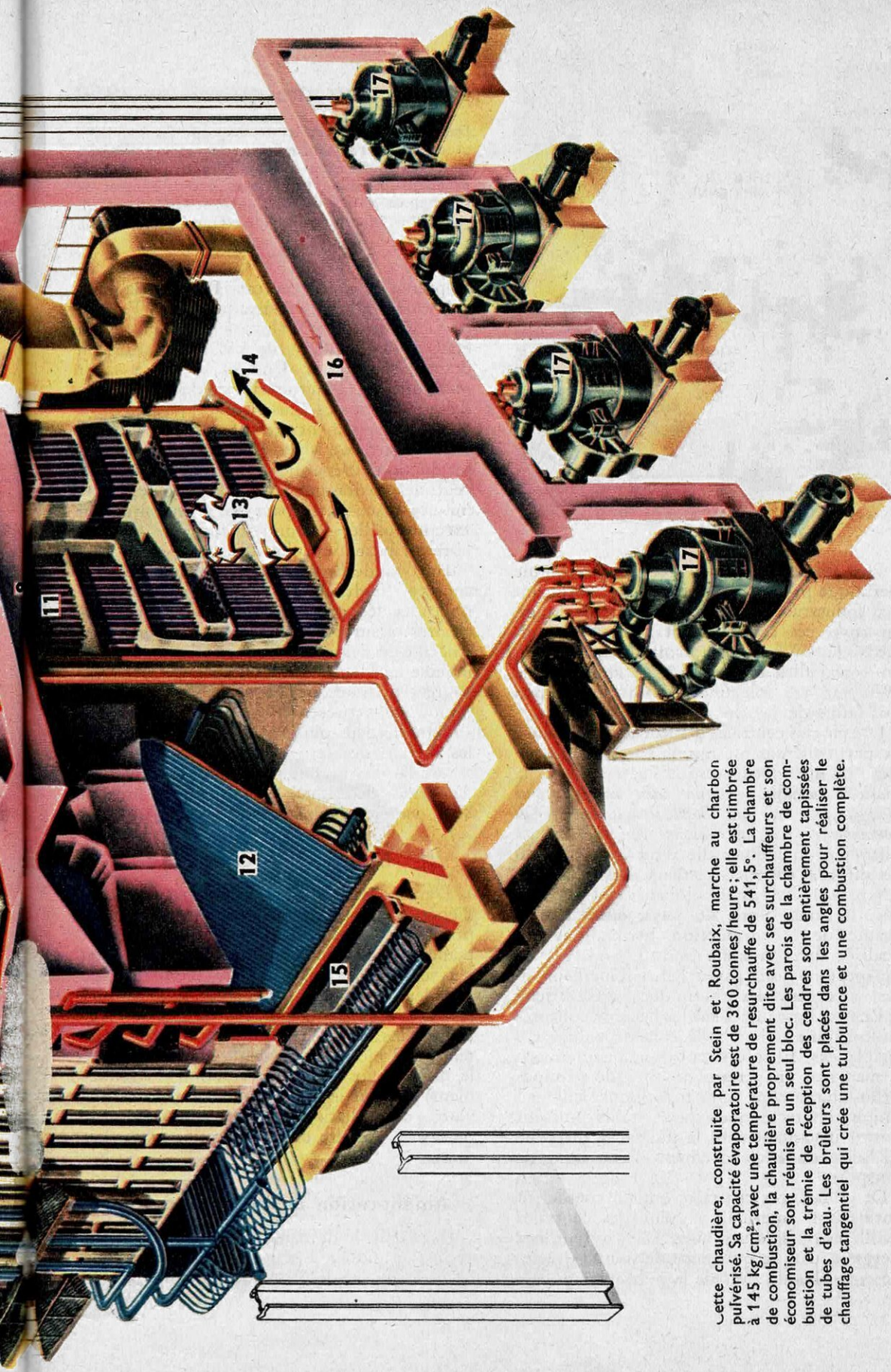
Le rôle des centrales thermiques

L'énergie électrique consommée en France est sensiblement pour moitié d'origine hydraulique et pour moitié d'origine thermique. En 1955, par exemple, 25,5 milliards de kWh furent produits par l'hydraulique et 24,1 milliards de kWh par le thermique. Le rapport est un peu différent en 1960 où 40,5 milliards de kWh furent produits par l'hydraulique et 31,8 milliards de kWh par le thermique, du fait de l'abondance des précipitations.

Ces chiffres ne doivent pas faire oublier que la production hydraulique est saisonnière et que, à certaines périodes de l'année (mois d'hiver), le thermique doit assurer près de 60% de la production globale. Ainsi, les puissances installées étaient en 1955 de 7,9 millions de kW pour l'hydraulique et de 8,2 millions de kW pour le thermique. En 1960, ces valeurs ont été portées respectivement à 10,2 millions de kW pour l'hydraulique et 11,7 environ pour le thermique.

- 1 Réservoir
- 2 Surchauffe haute température
- 3 Resurchauffe haute température
- 4 Surchauffe basse température
- 5 Resurchauffe basse température
- 6 Chambre de combustion
- 7 Économiseur
- 8 Brûleurs
- 9 Sortie d'air
- 10 Recyclage de fumées
- 11 Réchauffeur d'air
- 12 Écran de tubes d'eau
- 13 Entrée d'air
- 14 Sortie des fumées
- 15 Cendrier
- 16 Air chaud
- 17 Broyeurs à charbon





Cette chaudière, construite par Stein et Roubaix, marche au charbon pulvérisé. Sa capacité évaporatoire est de 360 tonnes/heure; elle est timbrée à 145 kg/cm², avec une température de surchauffe de 541,5°. La chambre de combustion, la chaudière proprement dite avec ses surchauffeurs et son économiseur sont réunis en un seul bloc. Les parois de la chambre de combustion et la trémie de réception des cendres sont entièrement tapissées de tubes d'eau. Les brûleurs sont placés dans les angles pour réaliser le chauffage tangentiel qui crée une turbulence et une combustion complète.

Une chaudière moderne: Centrale Comines II

millions de kWh



← Production thermique en 1960

Dans le Nord et l'Est, les productions des houillères et de la sidérurgie sont supérieures à celles des centrales thermiques d'E.D.F., tandis que celles-ci prédominent surtout dans les grands centres de consommation (région parisienne) et dans les régions pauvres en énergie hydraulique (Ouest de la France).

Plus de la moitié de l'énergie d'origine thermique provient des centrales appartenant aux industries houillères ou sidérurgiques. En 1955, ces centrales ont produit 15 milliards de kWh sur 24, soit environ 64%. En 1960, elles ont produit 17 milliards de kWh sur 31, soit une proportion un peu plus faible de 54%.

Le rôle des centrales d'Électricité de France est particulièrement ingrat. C'est à elles en effet qu'incombe presque entièrement la mission capitale : *fournir aux usagers toute l'énergie dont ils ont besoin, sous une forme convenable et ceci sans aucune interruption*. La centralisation industrielle rend cette mission très difficile. En effet, les deux tiers de la consommation électrique globale sont répartis dans la zone Nord du pays, alors que la totalité de la production hydraulique est localisée dans la zone Sud. Les artères de transport ne sont pas à l'abri d'incident, et c'est aux centrales thermiques d'Électricité de France, implantées sur les lieux de consommation, qu'est dévolu le rôle de pallier ces défaillances. Elles doivent donc maintenir en permanence un certain nombre de groupes turbo-alternateurs en fonctionnement au « minimum technique » pour qu'ils puissent fournir instantanément la puissance disparue par suite du déclenchement d'une ligne de transport.

De ce fait, ces centrales ont un coefficient d'utilisation inférieur à celui des centrales houillères ou sidérurgiques. Elles livrent leur énergie sous une puissance de pointe qui représente plus du tiers de la puissance globale

de pointe du réseau français. En 1955, la puissance de pointe du thermique E. D. F. était de 3 millions de kW alors que celle du réseau était de 8,9 millions de kW. Cette situation devrait s'améliorer dans les années à venir par suite de l'accroissement des difficultés d'équipement des sites hydrauliques et donc du développement relatif du thermique.

La répartition à peu près symétrique de la production d'énergie électrique entre les centrales hydrauliques et les centrales thermiques place notre pays dans une situation exceptionnelle. Partout ailleurs, le déséquilibre est beaucoup plus accentué.

En Grande-Bretagne, par exemple, les ressources hydrauliques sont pratiquement nulles et les centrales thermiques (ou nucléaires) assurent 98% de la production globale d'électricité. En Suisse, la situation est inverse par suite de l'importance des ressources hydrauliques, et la production thermique ne représente que 1,4% du total.

Dans les deux plus grands pays producteurs, les États-Unis et l'U.R.S.S., le thermique assure la plus grande partie de la production d'énergie électrique. Il représente environ 80% dans les deux cas.

Évolution des centrales

L'accroissement rapide de la consommation d'énergie électrique entraîne, pour les sociétés productrices, un effort continu d'équipement. Malgré l'ampleur des moyens mis en œuvre, il serait pratiquement impossible de doubler le parc de production tous les dix ans si d'importants progrès techniques n'étaient sans cesse effectués. Ces progrès portent aussi bien sur les résultats obtenus avec le matériel installé (augmentation du rendement) que sur la diminution relative des travaux d'installation (augmentation de la puissance unitaire et simplification des schémas).

Amélioration du cycle thermique

C'est dans le domaine de l'amélioration du cycle thermique, amélioration résultant de l'accroissement des pressions et températures

Équipement au début de 1961 →

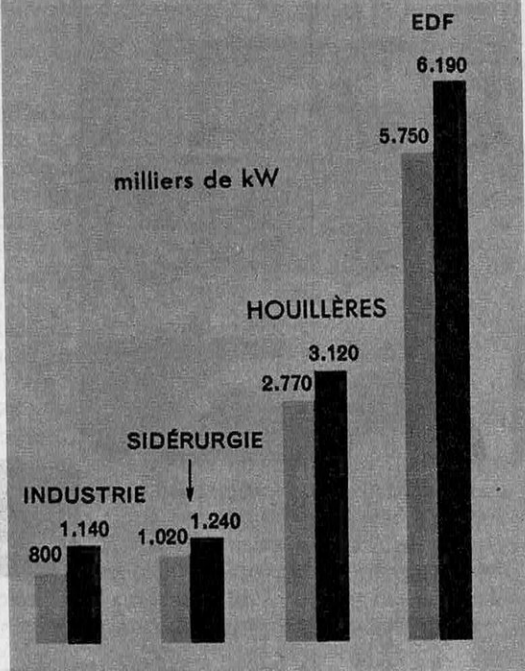
Pour chaque catégorie de producteur, on a indiqué à droite la puissance installée (somme des puissances nominales de ses générateurs principaux) et à gauche la puissance maximum possible de 15 heures, celle réalisable en service continu de 15 heures par jour, en l'absence de toute mise en réserve de matériel.

de vapeur conjugué avec l'emploi judicieux de surchauffe, resurchauffe et soutirages que, grâce aux progrès réalisés par la métallurgie, l'évolution des centrales thermiques a été le plus spectaculaire. Les principales étapes de cette évolution sont données par le tableau ci-dessous.

Une augmentation du rendement entraîne des économies considérables de combustible. Les centrales actuelles consomment environ 100 g de charbon de moins par kWh que les centrales, pourtant récentes, du plan Monnet. Si l'on considère une grande centrale de base à quatre groupes de 115 000 kW, utilisée 6 000 heures par an, l'économie annuelle de combustible est de l'ordre de 275 000 tonnes de charbon.

La consommation spécifique moyenne des centrales E.D.F. était de 3 020 cal/kWh en 1958, 2 850 en 1959 et probablement de 2 790 cal/kWh en 1960, soit un rendement global de 31%. Il faut mentionner que cette consommation spécifique est comparable à celle des centrales américaines et inférieure à celle des centrales soviétiques (respectivement 2 820 et 3 346 cal/kWh en 1959).

Il faut insister sur le fait que les hautes pressions et hautes températures augmentent la fatigue du métal. Pour réduire le taux de fluage, il a été nécessaire de créer des aciers spéciaux. Jusqu'à 450°C et 36 kg/cm², il ne s'est pas posé de problème particulier.



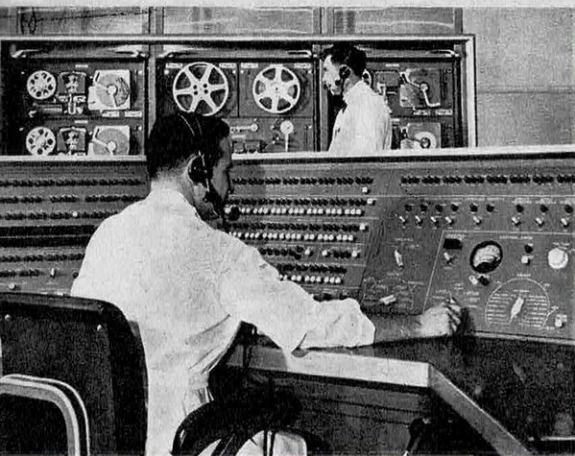
A partir de 545°C et 120 kg/cm², il a fallu employer des aciers ferritiques alliés dont la composition est généralement : 0,1% de carbone, 0,5% de manganèse; 1% de molybdène; 2,25% de chrome et 6% de silicium. Au-dessus de 550°C et 160 kg/cm², il est indispensable d'utiliser des aciers austénitiques de composition : 0,07% de carbone, 0,7% de tantale, 2% de molybdène, 15% de chrome, 17% de vanadium et 20% de nickel. Outre leur prix de revient élevé, ces derniers aciers se prêtent mal à la construction mécanique à cause de la difficulté de soudure. Les aciers austénitiques sont encore mal connus et des essais de fluage sont actuellement effectués par les laboratoires spécialisés.

Pour ces raisons, il paraît nécessaire, avant d'aller plus loin que le palier technique

Évolution du rendement des centrales thermiques

La dernière ligne de ce tableau indique les caractéristiques prévues pour la plus perfectionnée des centrales thermiques américaines, celle d'Eddy-stone. La marche industrielle de cette centrale nouvelle qui comporte une double resurchauffe de la vapeur est encore trop récente pour que l'on puisse raisonnablement parler dès maintenant de rendement réel.

ANNÉE	PRESSION	TEMPÉRATURE	RENDEMENT CARNOT	CONSUMATION SPÉCIFIQUE	RENDEMENT RÉEL
	kg/cm ²	°C	%	Cal/kWh	%
1920	12	300	49	6 450	13,3
1924	17	350	53	5 330	16,2
1930	36	425	58	4 940	17,4
1944	65	500	62	3 370	25,5
1944	88	520	63	3 000	28,7
1952	127/19	542/542	64	2 700	31,9
1960/1961	165/40	565/565	65	2 500	34,3
1960/1961	350/80/19	650/566/566	68,4	2 020	42,6



Techniques modernes....

.... carrières d'avenir

La Science Atomique et l'Electronique sont maintenant entrées dans le domaine pratique, mais nécessitent, pour leur utilisation, de nombreux Ingénieurs et Techniciens qualifiés.

L'INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL, répondant aux besoins de l'Industrie, a créé des cours par correspondance spécialisés en Electronique Industrielle et en Energie Atomique. L'adoption de ces cours par les grandes entreprises nationales et les industries privées en a confirmé la valeur et l'efficacité.

ÉLECTRONIQUE

Ingénieur. — Cours supérieur très approfondi, accessible avec le niveau baccalauréat mathématiques, comportant les compléments indispensables jusqu'aux mathématiques supérieures. Deux ans et demi à trois ans d'études sont nécessaires. Ce cours a été, entre autres, choisi par l'E.D.F. pour la spécialisation en électronique de ses ingénieurs des centrales thermiques.

Programme n° IEN.O

Agent technique. — Nécessitant une formation mathématique nettement moins élevée que le cours précédent (brevet élémentaire ou même C.A.P. d'électricien). Cet enseignement permet néanmoins d'obtenir en une année d'études environ une excellente qualification professionnelle. En outre il constitue une très bonne préparation au cours d'ingénieur.

De nombreuses firmes industrielles, parmi lesquelles : les Aciéries d'Imphy (Nièvre) ; la S.N.E.C.M.A. (Société nationale d'études et de construction de matériel aéronautique), les Ciments Lafarge, etc. ont confié à l'INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL le soin de dispenser ce cours d'agent technique à leur personnel électrique. De même, les jeunes gens qui suivent cet enseignement pourront entrer dans les écoles spécialisées de l'armée de l'Air ou de la Marine, lors de l'accomplissement de leur service militaire.

Programme n° ELN.O

Cours élémentaire. — L'INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL vient également de créer un cours élémentaire d'électronique qui permet de former des électroniciens « valables » qui ne possèdent, au départ, que le certificat d'études primaires. Faisant plus appel au bon sens qu'aux mathématiques, il permet néanmoins à l'élève d'acquérir les principes techniques fondamentaux et d'aborder effectivement en professionnel l'admirable carrière qu'il a choisie.

C'est ainsi que la Société internationale des machines électroniques BURROUGHS a choisi ce cours pour la formation de base du personnel de toutes ses succursales des pays de langue française.

Programme n° EB.O

ÉNERGIE ATOMIQUE

Ingénieur. — Notre pays, par ailleurs riche en uranium, n'a rien à craindre de l'avenir s'il sait donner à sa jeunesse la conscience de cette voie nouvelle.

A l'heure où la centrale atomique d'Avoine (Indre-et-Loire) est en cours de réalisation, on comprend davantage les débouchés offerts par cette science nouvelle qui a besoin dès maintenant de très nombreux ingénieurs.

Ce cours de formation d'ingénieur en énergie atomique, traitant sur le plan technique tous les phénomènes se rapportant à cette science et à toutes les formes de son utilisation, répond à ce besoin.

De nombreux officiers de la Marine Nationale suivent cet enseignement qui a également été adopté par l'E.D.F. pour ses ingénieurs du département « production thermique nucléaire », la Mission géologique française en Grèce, les Ateliers Partiot, etc.

Programme n° EA.O

AUTRES COURS

L'École des Cadres de l'Industrie dispense toujours les cours par correspondance qui ont fait son renom dans les milieux techniques :

FROID : n° 00 - DESSIN INDUSTRIEL : n° 01 - ÉLECTRICITÉ : n° 03 - AUTOMOBILE : n° 04 - DIESEL : n° 05 - CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES : n° 06 - CHAUFFAGE VENTILATION : n° 07 - BÉTON ARMÉ : n° 08 - FORMATION D'INGÉNIEURS dans toutes les spécialités ci-dessus (précisez celles-ci) n° 09.

Demandez sans engagement le programme qui vous intéresse en précisant le numéro et en joignant 2 timbres pour frais.

INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL

École des Cadres de l'Industrie

69, rue de Chabrol, Bâtim. A - PARIS Xe

POUR LA BELGIQUE : I.T.P., Centre administratif
5, Bellevue, WEPION

actuel (165 kg/cm^2 et 565°C en France), d'attendre que les premiers résultats d'exploitation de centrales expérimentales comme Eddystone aux États-Unis aient permis de vérifier la rentabilité d'une nouvelle augmentation des caractéristiques de la vapeur.

Augmentation des puissances

L'augmentation de puissance unitaire réduit considérablement les frais de premier établissement d'une centrale. Une chaudière de 360 tonnes/heure de capacité évaporatoire coûte moins cher que quatre chaudières de 90 t/h. De plus, l'augmentation de puissance a été accompagnée de progrès techniques tels qu'un groupe de 115/125 000 kW est à peine plus encombrant qu'un groupe de 50 000 kW. Il en résulte d'importantes économies de génie civil. L'intérêt des gains sur la construction apparaît immédiatement lorsqu'on sait que, dans une centrale moderne convenablement utilisée (6 000 h par an), les charges de premier établissement interviennent pour 12 % dans le prix de revient du kWh.

L'évolution technique est particulièrement intéressante en ce qui concerne les alternateurs. Elle résulte de l'emploi de tôles à plus faibles pertes, de meilleurs isolants (thermalastic par exemple) mais surtout, de l'utilisation de l'hydrogène comme fluide réfrigérant. Grâce à sa densité 14 fois plus faible que celle de l'air et à sa conductibilité thermique 7 fois plus grande, l'hydrogène permet d'évacuer 75 % de calories de plus à pression égale. Les alternateurs de 70 000 kVA de Nantes, refroidis à l'hydrogène sous une pression de 1 kg/cm^2 pèsent 1,8 t par 1 000 kVA. Ceux de 156 000 kVA de Creil, sous 2 kg/cm^2 d'hydrogène, ne pèsent que 1,5 t par 1 000 kVA. Enfin, le dernier groupe de 156 000 kVA de Nantes, sous 3 kg/cm^2 d'hydrogène, pèse 1,2 t par 1 000 kVA. Pour la centrale de Saint-Ouen, l'un des projets prévoyait l'utilisation d'un alternateur de 312 000 kVA pesant 219 tonnes, soit 0,7 tonne par 1 000 kVA (refroidissement par eau).

Dans le cas des groupes évaporatoires, la question ne se présente pas de la même façon. Le rapport du poids des surchauffeurs et resurchauffeurs au poids total de la chaudière augmente rapidement du fait de la part croissante de chaleur transmise à la vapeur par ces échangeurs. Comme ils sont construits en métaux plus coûteux que le reste de la chaudière, il y a là un facteur qui tend à augmenter les prix.

La surface nécessaire pour l'installation diminue naturellement lorsque la puissance

unitaire augmente. Les groupes de 50 000 kW, qui sont alimentés par deux chaudières, occupent une surface de 50 m^2 par 1 000 kW. Les groupes de 110 000 kW, alimentés par une seule chaudière, occupent 22 m^2 par 1 000 kW. Les groupes de 115/125 000 kW n'occupent plus que 17 m^2 par 1 000 kW. Dans le cas des groupes de 250 000 kW, la surface nécessaire est de l'ordre de $3\,280 \text{ m}^2$ soit environ 13 m^2 par 1 000 kW.

Un autre domaine où l'augmentation de puissance exerce une influence favorable est celui du contrôle et de la conduite des installations. Le nombre des appareils de mesures ou de réglages nécessaire au contrôle d'un groupe de 125 000 ou 250 000 kW est pratiquement le même que pour un groupe de plus faible puissance. Il en est de même pour le personnel de conduite. L'effectif des centrales modernes comprenant des groupes de 115/125 000 kW est 10 fois plus faible que celui des anciennes centrales (2 500 kW par agent au lieu de 250). La productivité doit encore augmenter dans les centrales qui comporteront des groupes de 250 000 kW.

Vers des groupes de 500 000 kW et plus

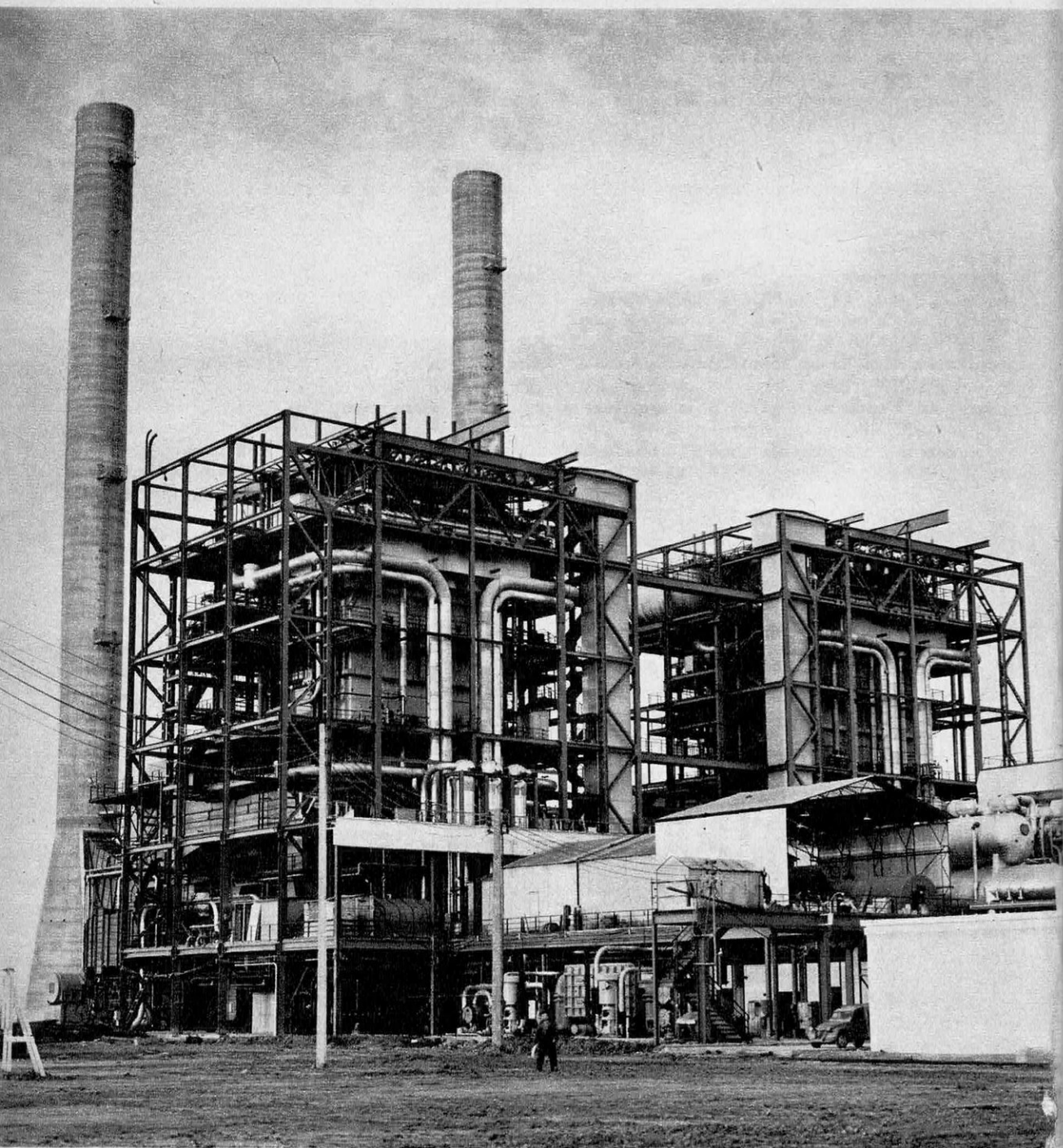
De 1905 à 1955, la puissance unitaire des groupes s'est accrue dans le rapport de 1 à 25. Dans les prochaines années à venir, la puissance actuelle sera encore doublée et vraisemblablement quadruplée. Voici quelles sont les principales étapes de cette évolution :

5 000 kW	en 1905,
20 000 kW	en 1920,
55 000 kW	en 1933
100 000 kW	en 1948
125 000 kW	en 1955
250 000 kW	en 1961-1962
500 000 kW	vers 1967.

En ce qui concerne le palier 250 000 kW, trois groupes sont étudiés et actuellement en commande. Huit autres seront installés dans les années à venir. Un groupe de 500 000 kW est élaboré en ce moment par les principaux constructeurs et les services spécialisés d'E.D.F.

Le maximum possible de la puissance unitaire d'un groupe est fonction de la puissance du réseau sur lequel il est couplé. On admet généralement que la sécurité d'un réseau n'est pas compromise si la puissance du plus important groupe couplé est inférieure ou égale au dixième de la puissance globale. Dans ces conditions, la perte instantanée de ce groupe ne compromet pas la stabilité du réseau.

De par l'importance de son réseau interconnecté, la France pourrait employer sans



Ph. Baranger

La centrale thermique de Bordeaux-Ambez

C'est une centrale du palier technique 115/125 MW pouvant fonctionner au fuel-oil lourd ou au gaz naturel. Elle comprend deux générateurs de vapeur de 360/400 t/h et deux groupes turboalternateurs de 115/125 MW à resurchauffe. Elle présente la

particularité d'être la seule centrale française construite intégralement sans bâtiment (type extérieur). L'abri coulissant visible au premier plan est utilisé uniquement pendant le montage de la turbine. Il est ensuite démonté et la centrale fonctionne en plein air.

Les centrales thermiques → dans le plan Monnet

Les installations de 1946 à 1950 sont disparates, avec des groupes de 20 000 à 110 000 kW. Celui de Gennevilliers, le plus puissant, est importé des États-Unis. A Caen, le matériel vient en partie de la centrale de Mannheim, démontée en fin de guerre.

danger des unités de puissances supérieures à celles que permettent actuellement les possibilités de l'industrie. La règle énoncée ci-dessus permet d'envisager une puissance de 900 000 à 1 000 000 kW.

Dans l'état actuel des choses, la puissance unitaire des groupes employés en France est faible devant celle du réseau (1,4 %). La perte instantanée d'un groupe est donc sans grande répercussion sur l'ensemble de la production. Ceci a permis (en abaissant volontairement le coefficient de sécurité) de simplifier les équipements et d'en améliorer le rendement par l'utilisation du schéma unitaire. Nous reviendrons plus loin sur ce schéma, qui a entraîné une modification profonde dans la conception des centrales thermiques.

Les paliers techniques

Le matériel entrant dans la constitution du parc thermique d'E.D.F. peut être classé en deux catégories : le matériel hétérogène mis en service avant l'adoption des paliers techniques (1950) et le matériel homogène mis en service depuis cette date.

Dans la première catégorie on distingue le thermique ancien, le thermique du plan Monnet et le thermique de transition.

Le *thermique ancien* est constitué par le matériel non encore déclassé des anciennes sociétés. Il ne représente plus que 1 200 000 kW de puissance installée. L'âge moyen des centrales le constituant est de 32 ans pour celles dont la pression de vapeur est inférieure à 30 kg/cm² et de 24 ans pour celles dont la pression est comprise entre 30 et 65 kg/cm². Il est caractérisé par de faibles pressions et de faibles températures de vapeur (12 à 65 kg/cm² et 300 à 470° C). La puissance des unités est échelonnée entre 12 000 et 55 000 kW.

Le *thermique du plan Monnet* marque la prise de l'effort d'équipement après la seconde guerre mondiale. La situation était critique à ce moment (1946 à 1950) et il a été nécessaire de réaliser au plus vite des projets faits préalablement dans le cadre des anciennes Sociétés. Les centrales de cette époque sont

Gennevilliers	110 000 kW
Comines	54 000 kW
Yainville	54 000 kW
Dieppedalle	50 000 kW
Lourches	40 000 kW
Séquedin	55 000 kW
Brest	20 000 kW
Ivry	40 000 kW
Vincey	20 000 kW
Caen	32 000 kW

caractérisées par le fait qu'elles sont construites par tranches. Dans chaque tranche, deux chaudières sont affectées à un groupe turbo-alternateur. Aucune liaison n'est prévue entre tranches.

Le *thermique de transition* est peu important par le nombre, mais marque une étape importante vers la conception des centrales actuelles. Il est représenté par les étapes I et II de la Centrale de Nantes et par l'extension de la Centrale d'Arrighi. La notion de tranche est encore plus accentuée. On voit apparaître les premières salles de commande centralisée, mais les départs électriques sont encore commandés à partir d'une salle indépendante ainsi que la synchronisation des alternateurs.

A la seconde catégorie, on ne peut rattacher pour l'instant que le palier technique 115/125 000 kW. Le palier suivant (250 000 kW) est complètement étudié et les premiers groupes seront couplés sur le réseau en 1961-1962.

Le palier 115/125 000 kW

Le *thermique du palier 115/125 000 kW* justifie une construction en série. Il est représenté en effet par 27 groupes en service (ou sur le point d'être démarrés) et par 10 autres groupes déjà commandés ou prévus. La liste des 27 premiers groupes est donnée par le tableau page 84. Les groupes possèdent tous les mêmes caractéristiques. La puissance nominale est de 115 000 kW mais peut être portée à 125 000 kW pendant 3 heures. Chaque groupe est alimenté par une chaudière unique de 360/400 t/h de capacité évaporatoire. La vapeur surchauffée est fournie sous 127 kg/cm² et à 540° C. La vapeur est resurchauffée à 540° C sous une pression de 29 kg/cm². La pression à l'échappement (condenseur) est de 0,035 kg/cm². Les installations sont conçues selon le schéma unitaire. L'automatisme et la commande à dis-

tance y sont très développés. La conduite de l'ensemble du « bloc » est effectuée en totalité à partir de la salle de commande. Il est prévu une salle de commande pour deux « blocs ».

Le palier 250 000 kW

Le thermique du palier 250 000 kW est déjà étudié et nous avons signalé plus haut que trois groupes sont commandés. Leur mise en service est prévue en 1961 ou 1962. Huit autres groupes sont prévus qui seront installés dans les années à venir. Ces groupes produiront 250 000 kW aux bornes de l'alternateur (déduire 6% d'auxiliaires). Chaque groupe sera alimenté par une chaudière de 770 t/h de capacité évaporatoire. La vapeur surchauffée sera fournie sous 165 kg/cm² et à 565° C. La vapeur sera resurchauffée à 565° C sous une pression de 40 kg/cm². La pression au condenseur sera la même que celle des groupes actuels (elle est fonction de la température de l'eau de circulation).

L'adoption des paliers techniques a de grandes répercussions sur la construction du matériel auxiliaire des centrales thermiques. Citons deux exemples, l'un relatif à la normalisation du schéma thermique et l'autre relatif à la normalisation du schéma électrique.

En ce qui concerne le schéma thermique, chaque groupe de 115/125 000 kW comprend trois pompes alimentaires d'une capacité de 200 t/h (2 pompes en service et 1 en réserve). Chacune de ces pompes est entraînée par un moteur asynchrone (rotor en court-circuit) à démarrage direct sous une tension de 5 500 volts. La puissance est de 1 500 kW et le moteur tourne à 1 500 t/m. Pour les 37 groupes en service ou prévus, il faut donc construire 111 moteurs identiques, ce qui, mètre réparti entre plusieurs constructeurs, représente une belle série.

La normalisation des puissances unitaires et des schémas d'alimentation des auxiliaires entraîne la normalisation des disjoncteurs à moyenne tension. Les caractéristiques actuelles sont les suivantes : pouvoir

de coupure de 250 000 kVA sous une tension de 5 500 volts. Si l'on considère qu'il faut en général 15 disjoncteurs de ce type par groupe, le palier technique considéré utilise 555 disjoncteurs identiques, au calibre d'intensité près.

Le schéma unitaire

Les anciennes centrales sont caractérisées par des liaisons « horizontales » entre les organes homologues. Les pompes alimentaires débitent toutes en parallèle dans un collecteur en boucle. Les chaudières sont raccordées sur ce collecteur et fournissent la vapeur à un second collecteur aussi important que le premier. Chaque machine pouvant être isolée sans interrompre le fonctionnement des autres, ceci nécessite une importante et onéreuse robinetterie.

Les alternateurs sont couplés en parallèle sur un jeu de barres intermédiaire à 10,5 kV. De même que pour les circuits eau et vapeur, ce jeu de barres est bouclé pour qu'un alternateur puisse être isolé du réseau, les autres alternateurs continuant à débiter en parallèle. C'est sur le jeu de barres intermédiaire que sont raccordés les transformateurs de puissance qui alimentent, en 60 ou 220 kV, les tableaux de départ.

Dans les anciennes centrales, les auxiliaires sont généralement alimentés par deux sources distinctes. Les auxiliaires vitaux sont branchés sur le réseau « machines » dont l'énergie est fournie par des turbo-alternateurs de faible puissance (de l'ordre de 5 000 kW). Les auxiliaires secondaires sont raccordés au réseau « transformateurs » qui est alimenté à partir du réseau haute tension. La complexité du réseau auxiliaire est encore plus grande que celle du réseau à 10,5 kV.

Une première étape vers l'adoption du schéma unitaire fut franchie en 1930, à l'occasion de la construction des centrales d'Arrighi et de Saint-Denis II. Le progrès réside dans la simplification du schéma électrique d'évacuation de l'énergie. Le jeu de barres à 10,5 kV est supprimé. Chaque alternateur est raccordé directement à son transformateur de puissance. Le disjoncteur est unique. L'économie réalisée est importante.

L'évolution du schéma thermique a été

Creil	4	Les	
Porcheville ...	4	Ansereuilles 2	
Comines	1	Strasbourg ...	2
Arrighi	1	Montereau	2
Nantes-		Bordeaux-	
Chevire	1	Ambes	2
Beautor	3	Lacq-Artix	2
Yainville	2	Châlon	1

← Groupes du palier 115/125 MW

Ce tableau donne la liste des groupes turbo-alternateurs actuellement en service ou sur le point d'être démarrés. Il faut y ajouter dix autres groupes en projet, dont les caractéristiques seront identiques.

plus lente. Dans les centrales du plan Monnet, il n'est pas prévu de liaison entre tranches mais chaque groupe turbo-alternateur est encore alimenté par plusieurs chaudières. Les circuits sont assez complexes.

Avec l'adoption systématique de la resurchauffe on en est arrivé au schéma actuel. Il est en effet très difficile de scinder un circuit de resurchauffe pour le répartir entre plusieurs chaudières. Désormais, chaque tranche comprend une chaudière, un groupe turbo-alternateur et un transformateur de puissance. Ce schéma unitaire a permis de réduire la longueur des tuyauteries et le nombre des vannes ou clapets. En plus des économies réalisées sur les dépenses de premier établissement, le schéma unitaire a permis d'améliorer le rendement puisque les liaisons se sont raccourcies.

La notion de tranche a été naturellement étendue aux circuits auxiliaires. Le groupe alimente maintenant ses propres auxiliaires à l'aide d'un transformateur dit « de soutirage » qui est branché directement aux bornes de l'alternateur. Le démarrage de l'installation est assuré à l'aide de transformateurs généraux qui empruntent l'énergie au réseau haute-tension. Le changement de source est effectué automatiquement dans le sens « réseau vers machine » dès que le groupe est en mesure d'alimenter ses propres auxiliaires. Il est effectué en sens inverse lors d'un arrêt.

La sécurité de fonctionnement est plus faible dans les centrales modernes puisqu'une tranche ne peut attendre aucun secours des tranches voisines. Cet abaissement du coefficient de sécurité a été accepté volontairement après étude des inconvénients et des avantages du schéma unitaire. Il a été dit plus haut qu'un groupe de 115/125 000 kW ne représente que 1,4 % de la puissance du réseau interconnecté. On admet donc que la perte d'un groupe ne compromet pas l'équilibre du réseau. D'autre part les progrès réalisés, tant dans le domaine de la métallurgie que dans le domaine de la construction électrique, rendent les incidents moins fréquents. Dans ces conditions, les avantages résultant de l'abaissement du prix de revient et de l'augmentation du rendement l'emportent largement sur les inconvénients.

Développement de l'automatisme

Devant l'importance des puissances mises en jeu et devant la complexité croissante des installations, on comprend aisément que l'homme ne puisse plus assurer une conduite manuelle respectant les conditions de sécurité et de meilleur rendement. Il doit être assisté

par un automatisme et un équipement de contrôle parfaits.

L'adoption du schéma unitaire milite, elle aussi, en faveur d'un automatisme plus poussé. Il a, en effet, été nécessaire, pour obtenir une bonne coordination des manœuvres et éviter les incidents dus aux transmissions d'ordre toujours lentes, de faire conduire chaque unité par un seul homme appelé « chef de bloc ». Ce conducteur unique doit disposer du maximum possible d'automates et d'instruments de mesures pour accomplir correctement sa mission.

Bien que le développement de l'automatisme vienne en seconde position dans l'ordre chronologique d'évolution des centrales thermiques, il constitue certainement la partie la plus spectaculaire de cette évolution.

Les automatismes de réglage

Les centrales thermiques françaises, comme nous l'avons dit, doivent fournir instantanément la puissance demandée. La rapidité des prises de charge imposées à chaque groupe rend délicat le réglage automatique de l'installation et particulièrement du générateur de vapeur, qui doit produire sans trop de retard la quantité de vapeur demandée instantanément par la turbine.

Le réglage du générateur de vapeur est de loin le plus difficile à effectuer, à cause du grand nombre des paramètres à prendre en considération (débit d'eau, de combustible, d'air, pression de vapeur, températures, etc.) et à cause de l'interaction des différentes chaînes de régulation.

Le débit d'eau admis en chaudière doit être égal, à tout instant, au débit de vapeur absorbée par la turbine (augmenté du débit des purges continues). Dans les centrales modernes, un certain nombre de pompes alimentaires est affecté à chaque générateur de vapeur et, de ce fait, il est possible de régler le débit d'eau par actions conjuguées sur des variateurs de vitesse et sur une soupape placée au refoulement. La soupape réagit instantanément et une correction est exercée ultérieurement par variation de vitesse des pompes.

La chaîne de réglage des débits de combustibles a pour rôle de proportionner, à tout instant, l'admission des combustibles aux besoins en calories de la chaudière. Le problème est simple à résoudre lorsque les combustibles sont liquides ou gazeux. Il suffit d'agir sur des soupapes, et la réponse est presque instantanée. Il en va autrement lorsque l'un des combustibles est un solide pulvérisé (charbon ou lignite). Le réglage est alors effectué par action sur la vitesse des distributeurs

qui admettent le charbon brut dans les broyeurs. C'est seulement lorsque le charbon est broyé que les résultats du réglage se font sentir et cette constante de temps freine la réponse d'ensemble. D'autre part, on ne sait pas encore mesurer industriellement un débit de charbon pulvérisé et, de ce fait, la chaîne de réglage ne reçoit qu'une réaction indirecte, la vitesse des distributeurs, par exemple. Cette réaction n'a plus grande signification lorsque le charbon humide s'agglomère dans les tuyauteries et cesse d'arriver au distributeur. Ce problème fait encore l'objet de très importantes études.

Le débit d'air de combustion a été, avec l'alimentation en eau, l'un des premiers à être réglé automatiquement dans les centrales thermiques. La chaîne de réglage a pour mission d'admettre en chaudière la quantité d'air exactement nécessaire pour la combustion correcte des combustibles, compte tenu des excès d'air à respecter (25 % pour le charbon pulvérisé, 15 % pour le fuel-oil et 10 % environ pour le gaz naturel). Le critère de réglage est généralement la teneur en oxygène des fumées.

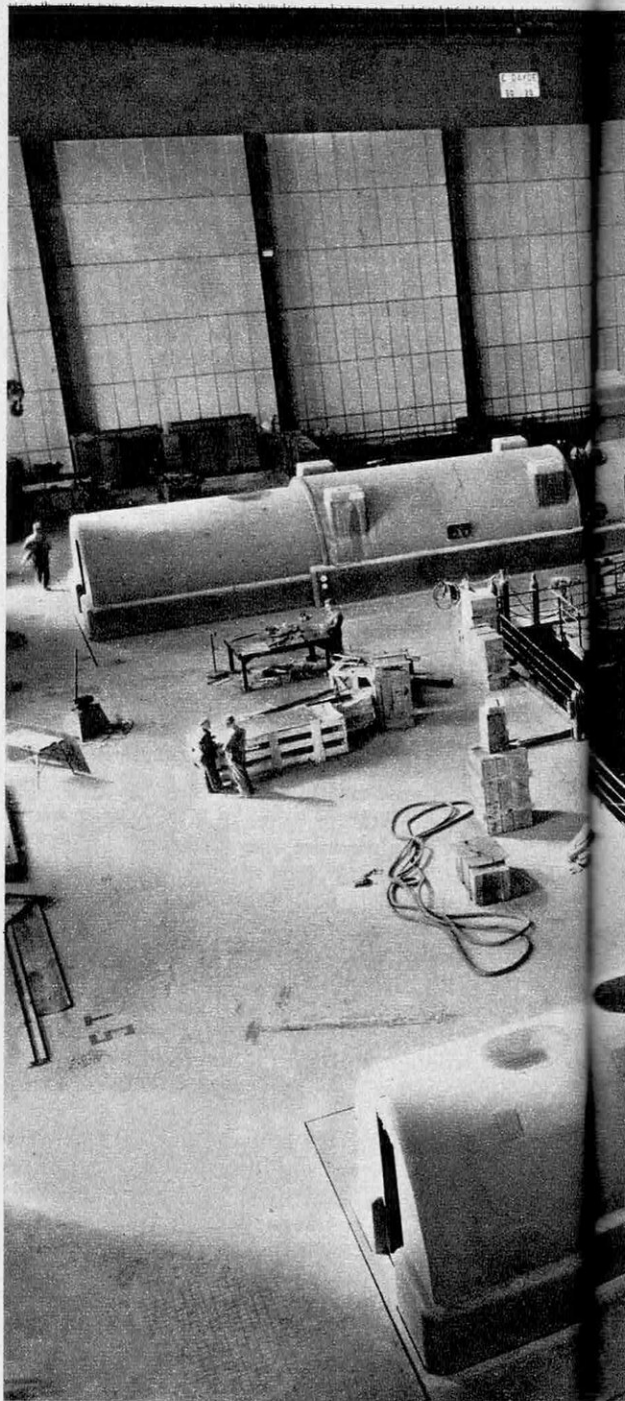
Le réglage des températures de vapeur surchauffée et resurchauffée est de loin le plus délicat à effectuer. La difficulté réside dans le fait que les paramètres exerçant une influence sur les températures de vapeur sont nombreux et que les organes de réglage de ces températures agissent très lentement (temps de réponse de plusieurs minutes). Les tolérances sont strictes parce que les métaux travaillent pratiquement à la limite de leurs possibilités.

La régulation électronique

On dispose d'un grand choix d'organes pour effectuer le réglage. Il peut être obtenu par inclinaison des brûleurs (qui change la position de la flamme, donc le rapport des surfaces à rayonnement et à convection), par recyclage des fumées, par action sur des registres changeant le débit des fumées traversant les surfaces à convection, et enfin à l'aide de désurchauffeurs (injections d'eau dans la vapeur ou échangeurs de température). Devant un tel problème, il est difficile de définir des règles générales.

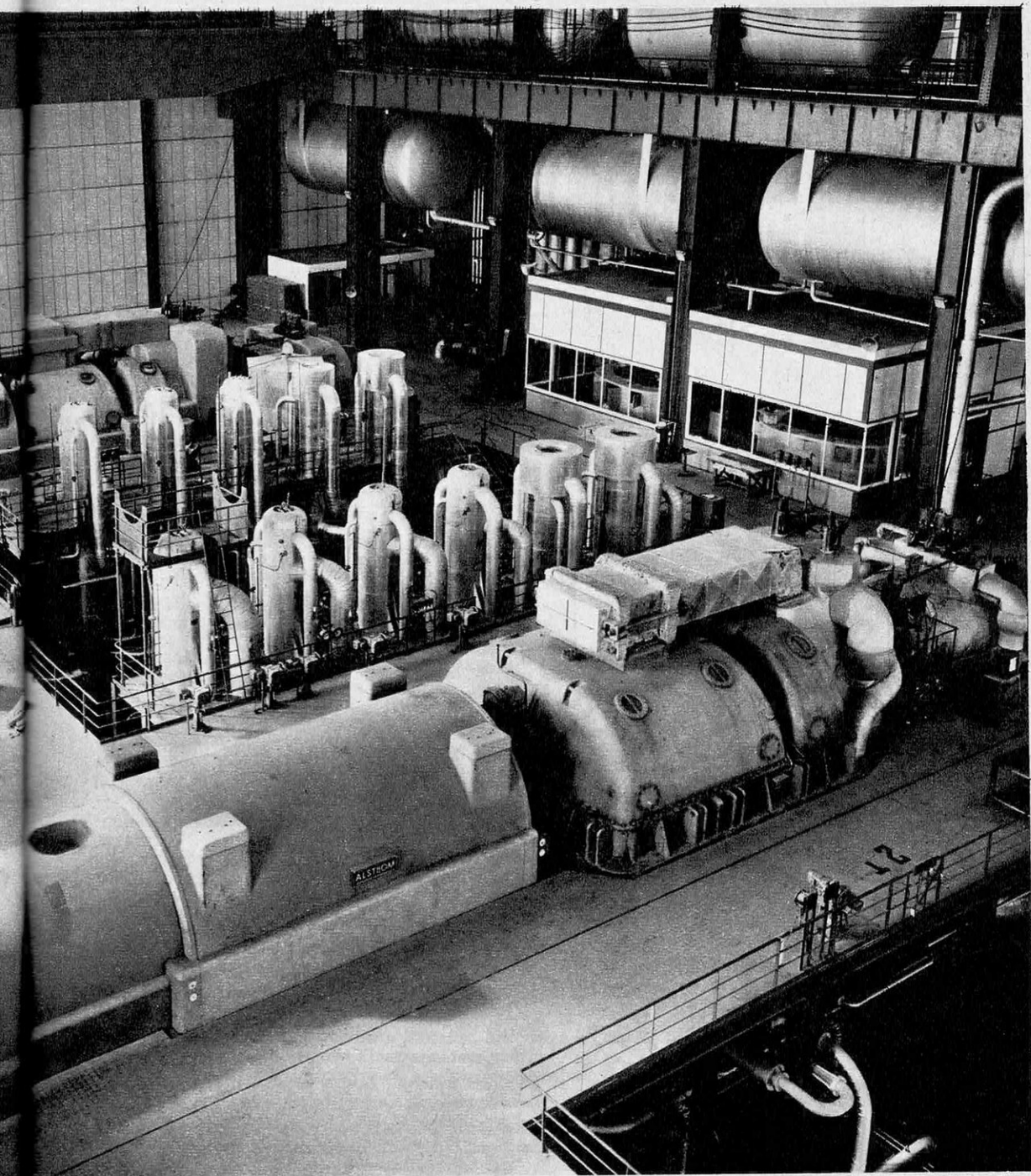
Les calculateurs analogiques de régulation sont de plus en plus réalisés sous une forme électronique beaucoup plus souple d'emploi et beaucoup plus stable dans le temps que les anciennes réalisations pneumatiques.

Électricité de France construit en ce moment la centrale thermique de Saint-Ouen dont la régulation sera entièrement électronique, l'air comprimé ayant totalement dis-



La centrale de M

CETTE centrale, une des plus modernes du genre, est destinée à alimenter la Région Parisienne. Sa marche est prévue au charbon et au gaz de Lacq. Elle développera au total une puissance de 1 000 000 de kW lorsque ses huit tranches de type unitaire seront



Ph. Baranger

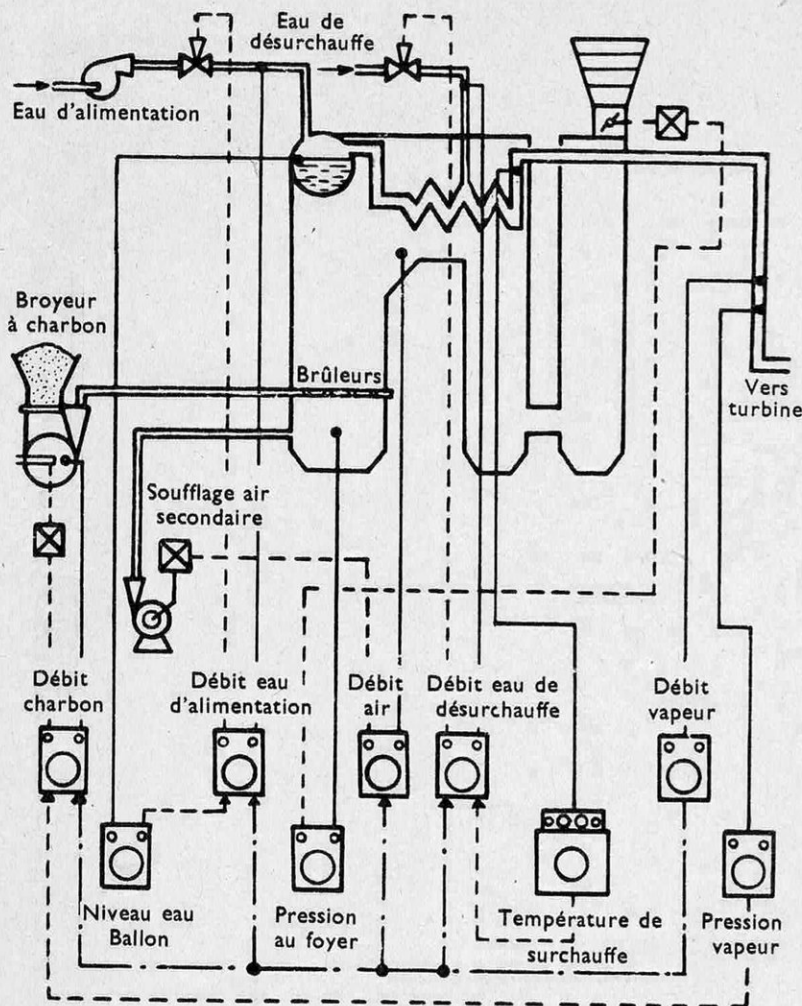
le Montereau fournira 1 000 000 de kW

en service. Actuellement deux tranches seulement, celles que l'on voit sur la photo, sont entrées en fonctionnement, l'une le 1^{er} juillet 1959, l'autre le 23 février 1960. Chaque tranche comprend : un groupe générateur de vapeur de 400 t/h équipé pour

la chauffe simultanée au charbon pulvérisé et au gaz naturel, une turbine de 125 000 kW (à droite), un alternateur 15,5 kV de 156 000 kVA (à gauche), refroidi à l'hydrogène, et un transformateur de 140 000 kVA, pour la tension finale de 230 kV.

Schéma de réglage d'un générateur de vapeur

Ce dessin schématique permet de se faire une idée approximative de la complexité des chaînes de réglage d'un générateur à vapeur et de la grande diversité des facteurs qui entrent en ligne de compte (débits, niveaux d'eau, pressions, températures, etc.). On voit par ailleurs que le principal facteur perturbateur, le débit de vapeur, exerce de multiples actions de tendance en positionnant de manière grossière tous les organes de réglage agissant sur le débit de charbon, le débit d'eau d'alimentation, le débit d'air, le débit d'eau de désurchauffe, sans attendre que les valeurs à régler se soient trop écartées de leur valeur normale. La pression de vapeur n'agit au contraire, dans ce schéma, que sur le débit de charbon, la température de surchauffe que sur le débit d'eau de désurchauffe; il en est de même pour les autres paramètres indiqués.



paru. D'importants perfectionnements seront étudiés expérimentalement dans cette centrale, la régulation électronique pouvant être reliée directement à des dispositifs séquentiels et à des calculateurs numériques de grande précision.

Les automatismes à séquences

Pour bien définir ce qu'est une commande séquentielle, nous choisirons ici un exemple concret : la mise sous vide du condenseur au moment de la préparation de la turbine. Dans le cas d'un démarrage à froid, un ordre unique provoque simultanément la mise en service de deux pompes à vide et de deux éjecteurs à vapeur, ces quatre organes étant souvent nécessaires pour que le temps de mise sous vide ne soit pas supérieur à 20 minutes environ. Dès qu'il reçoit le compte rendu de mise en service des pompes à vide et des éjecteurs, l'auto-

matisme à séquences général commande la suite des opérations de démarrage de la turbine, laissant les organes de mise sous vide sous la seule dépendance de leur séquence particulière.

Lorsque le vide atteint une valeur intermédiaire de 650 mm de mercure environ, un manostat coupe le circuit des éjecteurs à vapeur; il en est de même pour l'une des pompes à vide qui est isolée lorsque le vide atteint la valeur normale; l'autre reste en service permanent pendant la marche du groupe.

La séquence particulière tient compte automatiquement des conditions de démarrage. Lors d'un démarrage à chaud par exemple, elle ne met pas les éjecteurs en service si le vide résiduel est meilleur que 650 mm de mercure. Par ailleurs, la séquence reste en alerte permanente pendant la marche du groupe et remet les éjecteurs en service en cas de baisse accidentelle de vide. Toutes ces opérations sont commandées sans nouvelle

intervention de l'automatisme général.

On voit que l'automatisme à séquences donne des ordres d'exécution et ne peut passer à l'opération suivante que lorsqu'il a reçu un compte rendu d'exécution donné par des appareils tels que manostats ou thermostats.

L'extension des commandes séquentielles automatiques représente très certainement la partie la plus spectaculaire et la plus importante de l'évolution des centrales thermiques modernes. En supprimant totalement l'intervention du conducteur, l'automatisme doit annuler les risques de fausses manœuvres et améliorer les conditions d'exploitation. Les répercussions des fausses manœuvres n'ont pas toutes le même caractère de gravité, certaines ne provoquant que des déclenchements intempestifs alors que d'autres peuvent provoquer d'importants dommages corporels et matériels. Quel que soit l'aspect envisagé, l'automatisme doit accroître la sécurité et la régularité de marche d'une centrale thermique. Pour ces raisons, il faut envisager, après une phase expérimentale qui est représentée en France par la centrale de Saint-Ouen, une généralisation de l'automatisme dans les centrales thermiques, aussi complexes soient-elles, même dans celles qui utilisent du charbon pulvérisé.

Les calculateurs numériques dans les centrales modernes

Une autre étape importante est actuellement en cours de réalisation dans le domaine de l'évolution des centrales thermiques. Il s'agit de l'utilisation de « machines qui pensent », à savoir de calculateurs numériques. Ces derniers ont des possibilités suffisamment étendues pour qu'il soit possible de les utiliser à plusieurs fins : remplacement de certains appareils enregistreurs, amélioration du rendement et simplification des commandes.

Pour préciser chacun de ces points à partir d'un exemple concret, il faut encore faire appel à la centrale de Saint-Ouen qui utilisera deux calculateurs numériques, un en service, l'autre en réserve.

Une première utilisation du calculateur permettra de remplacer la majeure partie des enregistreurs classiques et permettra de mettre les variables mesurées à la disposition du conducteur sous une forme plus commode à interpréter. L'équipement de traitement des informations aura une capacité utilisée de 500 variables, qui seront scrutées en un temps global de l'ordre de la minute.

Les variables principales utilisées pour la conduite de l'installation seront mises à la

disposition du conducteur à l'aide d'indicateurs ou d'enregistreurs classiques. Les variables secondaires, utilisées essentiellement pour l'étude « a posteriori » d'un incident ou à des fins statistiques, seront mises à disposition à l'aide d'un certain nombre de machines à écrire automatiques (9 environ). Pour éviter l'impression et la conservation d'un trop grand nombre de résultats, les variables ne seront notées que toutes les 15 minutes en temps normal. En cas d'alarme, ou sur appel volontaire du conducteur, les variables pourront être notées toutes les minutes sur une machine spéciale.

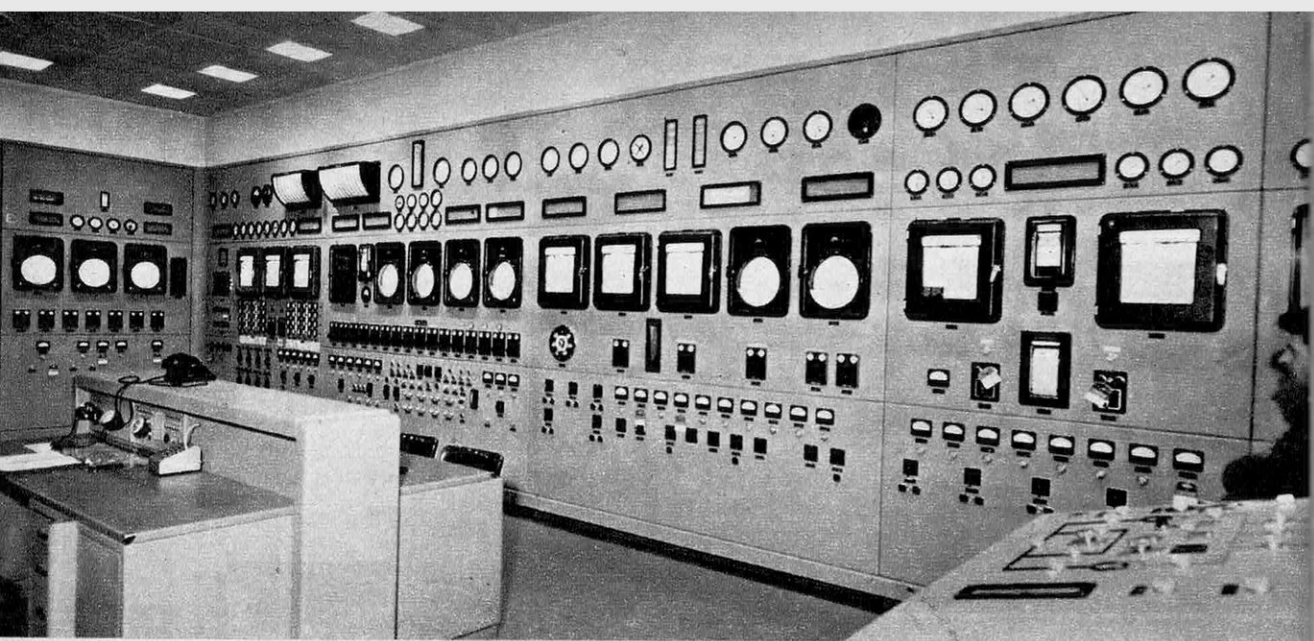
Le calcul automatique des rendements

Le calculateur, en outre, utilisera environ 40 des 600 variables pour établir le « bilan économique » de l'installation.

Le principe général consistera à calculer la consommation spécifique réelle par la méthode des pertes séparées : pertes de l'alternateur, de la turbine, de la chaudière, consommation des auxiliaires, etc. Cet ordre de calcul permettra d'extraire un certain nombre de résultats partiels qui seront mis à la disposition du conducteur pour le guider dans la conduite de l'installation.

Les calculs seront effectués à partir de valeurs moyennes des différentes variables. La scrutation étant assurée toutes les minutes, le calculateur établira la moyenne de 15 points pour obtenir un élément du calcul. Les résultats seront ainsi communiqués toutes les 15 minutes.

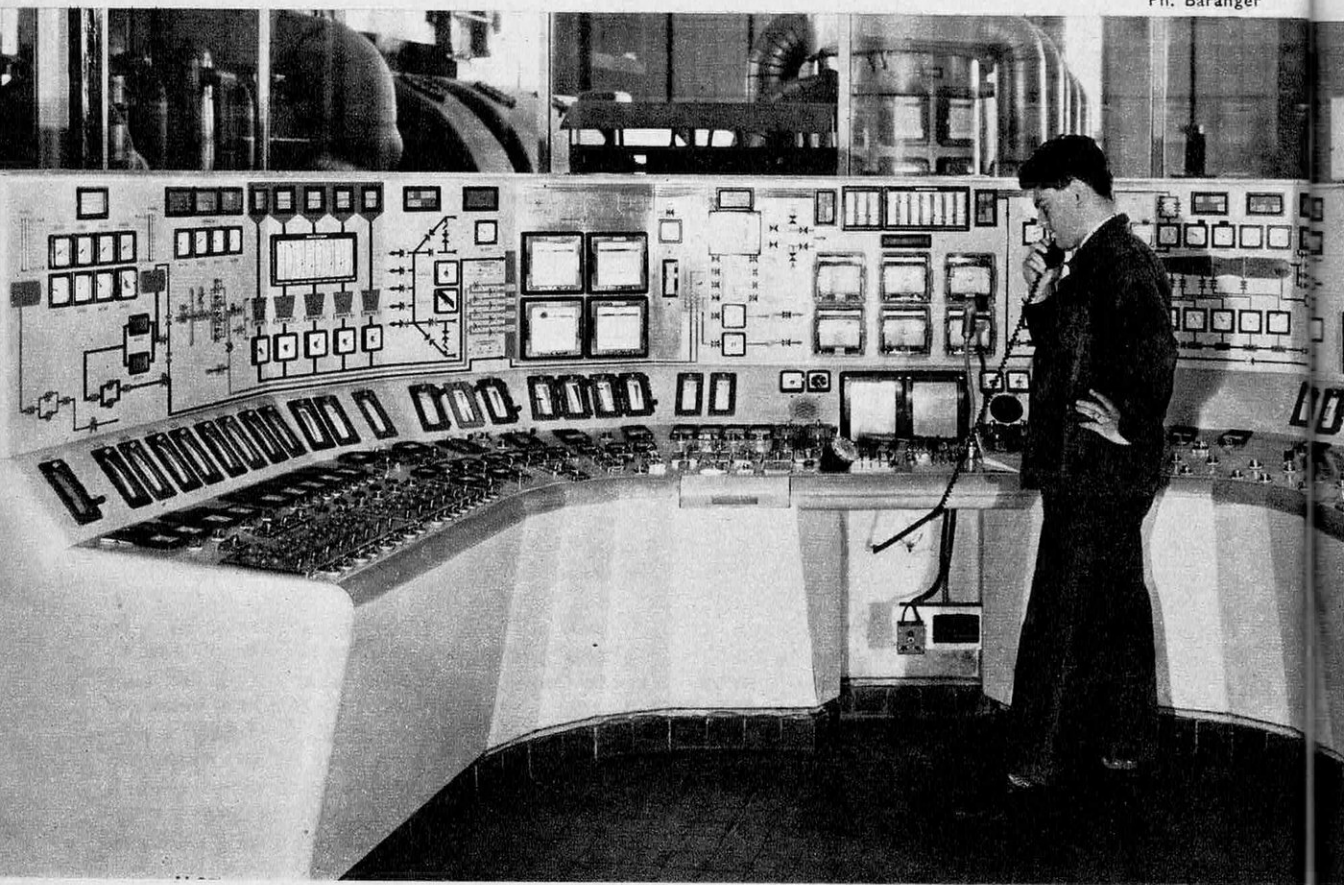
Le classement méthodique des résultats partiels du calcul permettra d'obtenir des informations relatives au rendement de la turbine, à celui de la chaudière, etc. Cette fonction du calculateur, en plus de ce qu'elle correspond par principe à son rôle principal, est celle qui permet d'en justifier économiquement l'utilisation dans les centrales thermiques. En effet, la complexité et le nombre des calculs nécessaires pour l'obtention d'un bilan économique sont tels que ce calcul est effectué tous les mois dans les centrales classiques. A la limite, les conducteurs sont donc avertis un mois trop tard qu'ils utilisent la centrale avec un mauvais rendement, à la suite, par exemple, d'une entrée d'air au condenseur. La mise à disposition des résultats tous les quarts d'heure permettra au chef de bloc d'alerter quasi immédiatement les services compétents. Des essais préliminaires, effectués à la centrale américaine de Sterlington, permettent d'avancer le chiffre de 6 cal/k Wh en ce qui concerne la réduction moyenne de con-



Salles de commande centralisée

Dans les centrales modernes, chaque unité est conduite par un seul homme appelé « chef de bloc », qui doit disposer du maximum d'appareils automatiques et d'instruments de contrôle. Les premières salles de commande centralisée furent installées à Nantes-Cheviré avec les organes de conduite sur des tableaux verticaux (ci-dessus). La création d'appareils « miniatures » a permis de grouper tous ces appareils sur le dossier d'un pupitre semi-circulaire, comme à la centrale de Montereau (ci-dessous), et le conducteur du bloc n'a plus pratiquement à se déplacer.

Ph. Baranger



somation spécifique due à une meilleure information du conducteur. L'économie résultante, portant sur des quantités importantes de combustible, est considérable.

Un certain nombre de pistes du calculateur sera réservé pour étudier le comportement des chaînes de régulation automatique au moment de leur mise en service et de leur réglage.

Dans un domaine très proche du précédent, il sera possible d'utiliser le calculateur de réserve pour étudier expérimentalement le comportement au transfert des systèmes commandés. Ces essais seront particulièrement intéressants en ce qui concerne la chaudière, car ils permettront de chiffrer les différents temps morts ainsi que les inerties, et ils permettront par là, d'améliorer la construction des centrales futures.

Liaisons expérimentales futures

A l'instant du premier démarrage de la centrale de Saint-Ouen, les deux équipements principaux (automatisme et traitement des informations) seront totalement indépendants. Par contre, ils sont étudiés pour que les

signaux y soient disponibles sous une même forme et pour qu'il soit possible de les relier l'un à l'autre.

Le dispositif de traitement des informations pourra ainsi être utilisé pour doubler certains comptes rendus destinés à l'automatisme à séquences. Si les détecteurs programmés dans le calculateur s'avèrent plus sûrs que l'appareillage local, manostats et thermostats qui ne sont pas toujours fidèles, ils seront ultérieurement employés seuls.

On s'est même demandé si le calculateur ne serait pas capable, avec une capacité de mémoire suffisante, de remplacer purement et simplement l'automatisme à séquences.

Certains renseignements en provenance des États-Unis amènent à penser qu'il serait nécessaire d'utiliser une mémoire d'environ 100 000 mots (les calculateurs industriels ont généralement une mémoire de 8 000 mots). Si cette affirmation est vérifiée, il n'est pas évident que la chose soit rentable et que les calculateurs puissent remplacer l'équipement séquentiel.

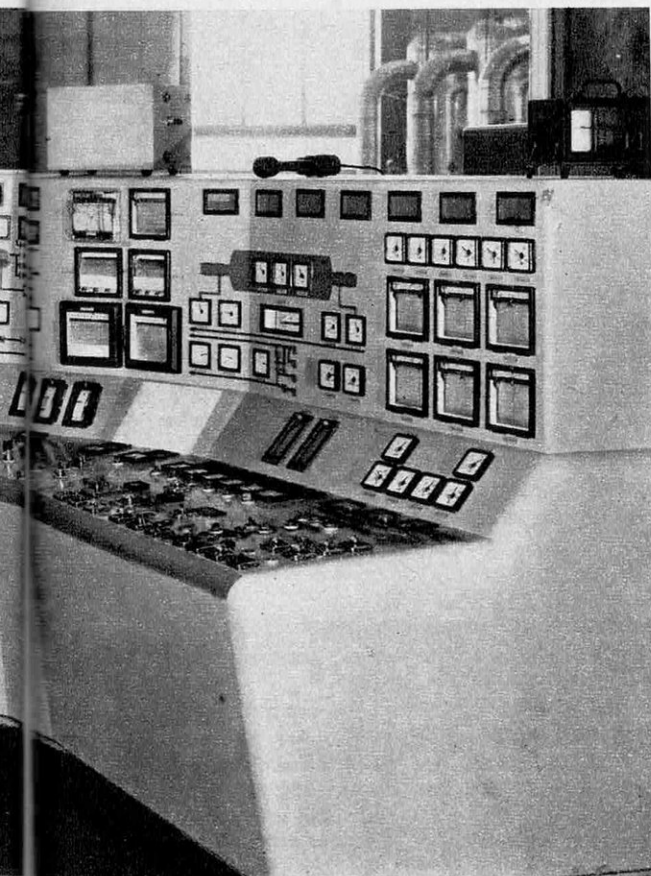
Pour la régulation, les signaux de rendements partiels délivrés par le calculateur pourront être reliés à certaines chaînes de réglage. Ces signaux **seront** délivrés sous une forme numérique toutes les 15 minutes. Pour que le réglage reste continu, il ne sera possible de les faire agir qu'en tête des chaînes analogiques classiques afin d'en modifier les points dits « de consigne ». L'installation pourra ainsi fonctionner toujours dans les conditions de meilleur rendement. Si, par exemple, il est impossible d'obtenir une température de surchauffe, le calculateur pourra augmenter le point de consigne de la chaîne de pression de vapeur, ceci pour améliorer le rendement de la turbine.

Si l'on pense, comme les Américains, que les conducteurs de la centrale de Sterlington réagissaient sainement une fois sur deux lorsque le calculateur en essai leur signalait un écart de consommation, on peut en déduire que la consommation spécifique d'une centrale automatique sera diminuée de 12 cal/kWh lorsque le calculateur agira directement sur les points de consigne des chaînes de réglage. Dans ces conditions, l'économie réalisée lors de l'exploitation de la centrale justifie pleinement le prix d'achat élevé des calculateurs.

Les prochaines années d'exploitation des nouvelles centrales thermiques seront très riches d'enseignements dans tous les domaines et permettront de définir avec exactitude les caractéristiques des futurs paliers techniques.

Roland CHAUSSARD

Ingénieur à Électricité de France.



les centrales nucléaires

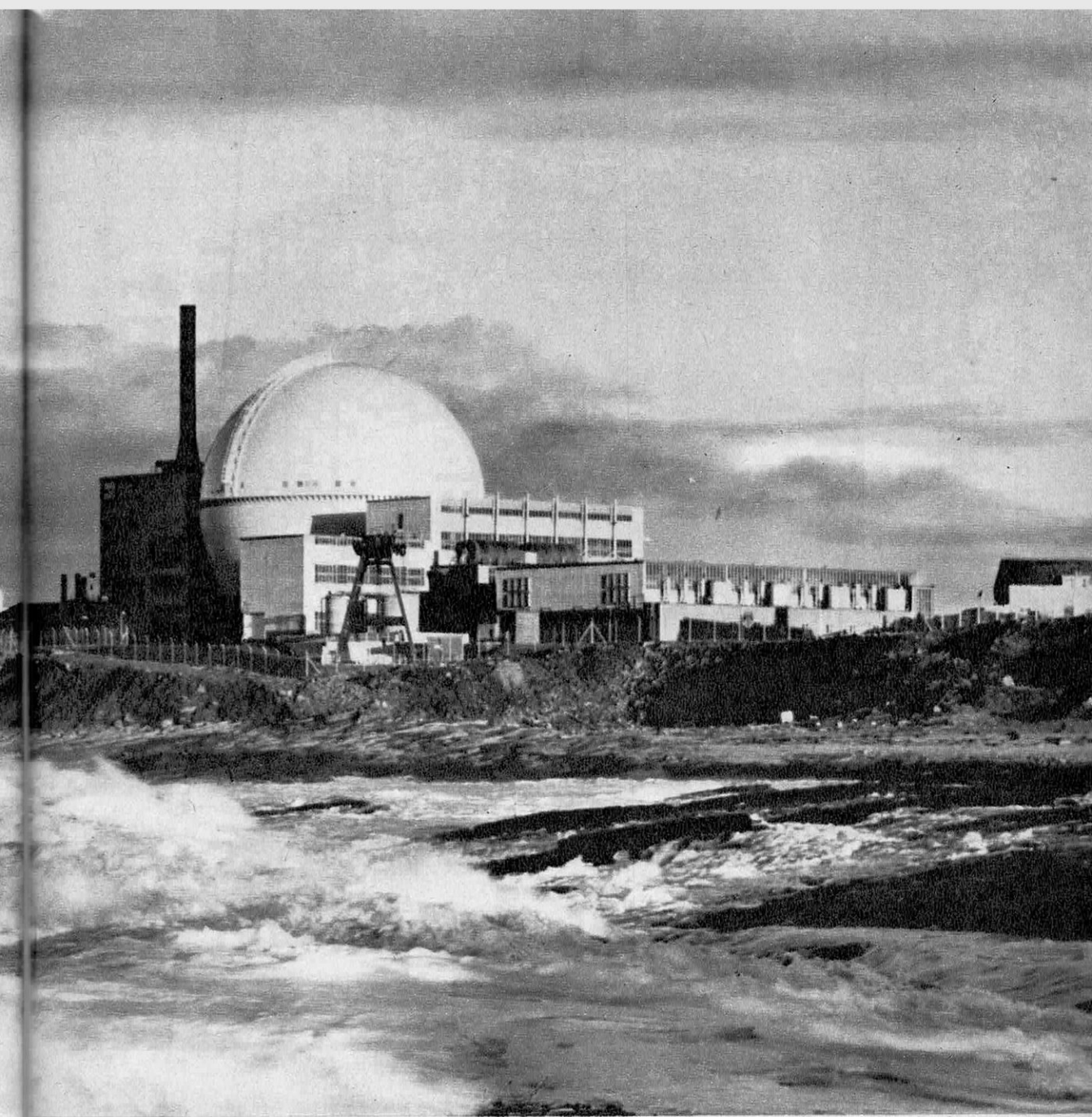


LE 2 décembre 1942, une équipe de chercheurs dirigés par le professeur Enrico Fermi obtenait pour la première fois une réaction de fission en chaîne dans une pile atomique installée sous les gradins du stade de l'Université de Chicago : on peut considérer que de ce jour date l'entrée de notre monde dans l'ère de l'énergie nucléaire.

Neuf ans plus tard, en décembre 1951, une

installation expérimentale débitait plus d'une centaine de kilowatts sur un réseau de distribution de la petite ville américaine d'Arco, voisine du célèbre centre de recherches de Los Alamos.

Neuf ans encore, et nous voici parvenus à un stade où l'existence de l'énergie nucléaire se manifeste déjà sous la forme de plusieurs centaines de milliers de kilowatts déversés sur divers réseaux dans le monde.

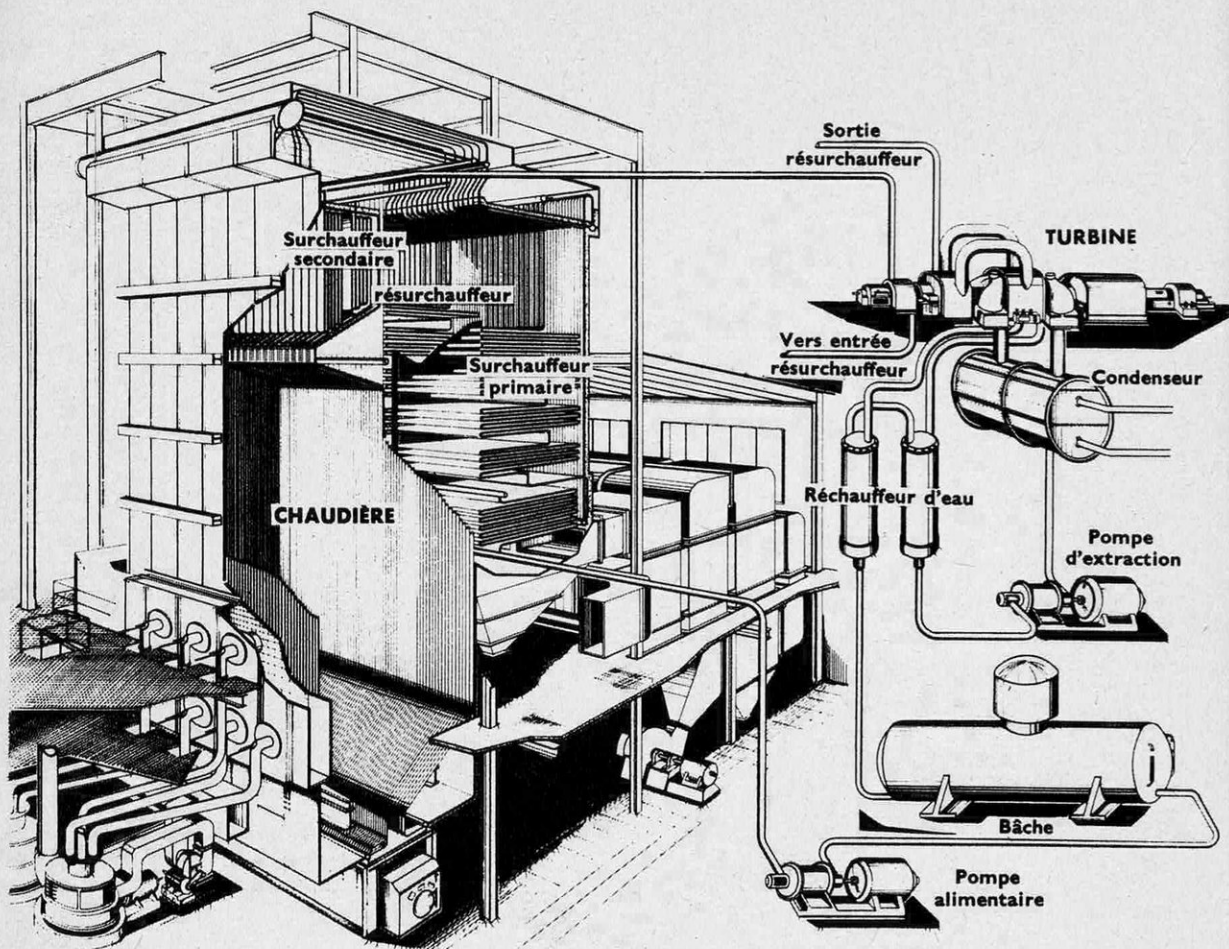


La centrale de 15 000 kW de Dounreay (G. B.) à réacteur rapide.

La révolution nucléaire serait-elle donc faite et toutes les conditions seraient-elles remplies pour qu'une puissante industrie nucléaire se développe et permette la substitution progressive de l'énergie de fission aux formes classiques de l'énergie ? Malheureusement pas encore, car si les problèmes techniques sont en voie d'être résolus, les prix de revient sont actuellement encore trop élevés. En examinant l'état des diverses

techniques, il faut garder présent à l'esprit le fait que le problème est maintenant essentiellement économique et qu'une puissante industrie nucléaire ne naîtra que le jour où l'égalité des prix entre cette nouvelle forme d'énergie et les formes conventionnelles sera sur le point d'être atteinte, en d'autres termes, le jour où l'énergie nucléaire deviendra « compétitive ».

Examinons donc en détail comment s'é-



Une centrale thermique tradition

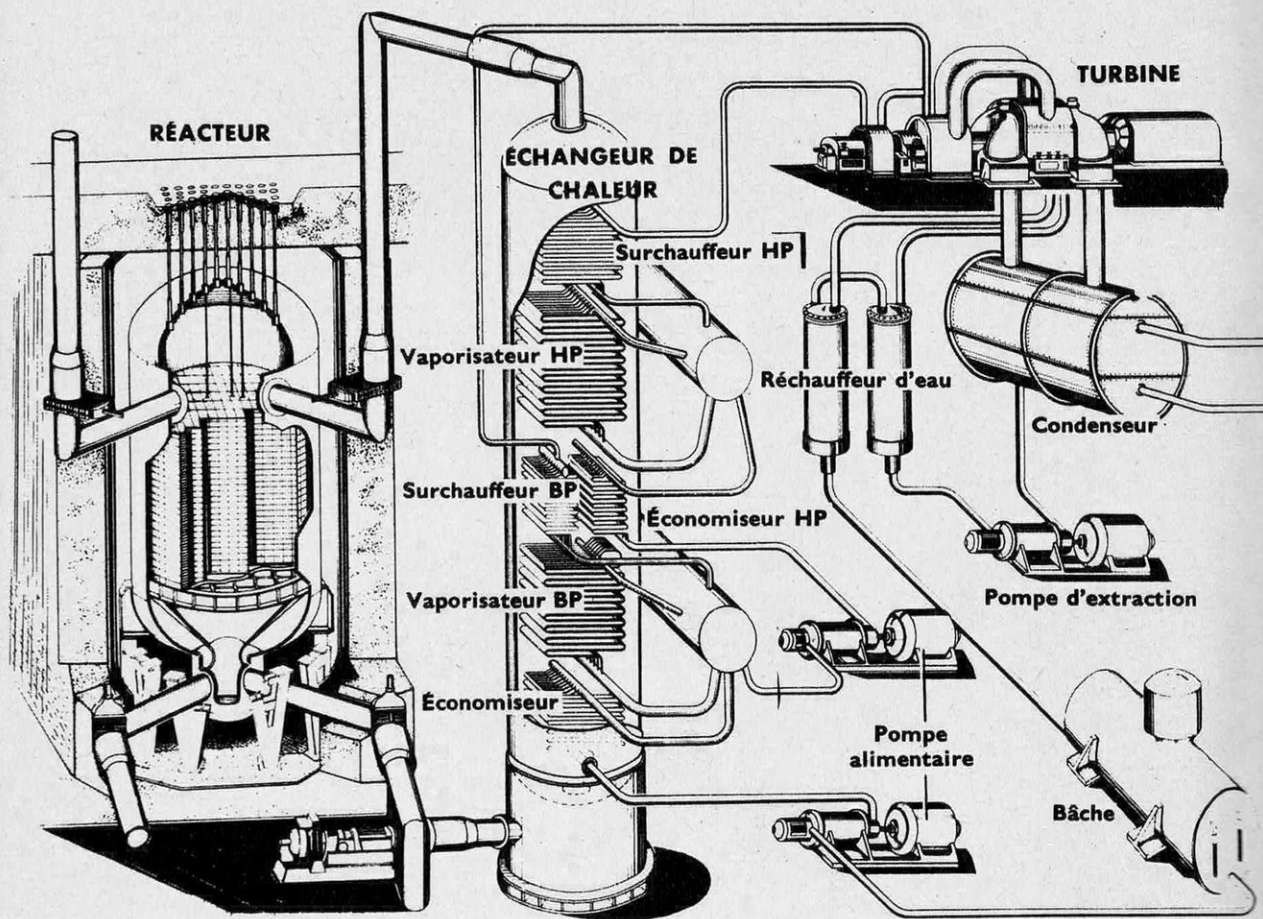
Ces deux schémas simplifiés permettent de mettre en évidence les différences essentielles de construction d'une centrale thermique traditionnelle et d'une centrale nucléaire du type à réacteur modéré au graphite et refroidi au gaz. Les circuits d'eau et de vapeur sont très semblables dans les deux cas ; seule la chaudière se trouve remplacée par l'ensemble réacteur-échangeur de chaleur. Gaz de refroidissement d'une part, eau

valuent les coûts de production qui ne sont, il ne faut pas l'oublier, qu'une faible part du prix de revient de l'énergie électrique livrée aux abonnés : une centrale électrique entraîne, du fait même de son existence, des « charges fixes » qui subsistent même si l'on ne fait pas appel à elle pour produire de l'énergie : ce sont essentiellement les dépenses d'amortissement du capital engagé, et les dépenses de personnel et d'entretien nécessaires pour l'exploitation et le maintien en état. A ces frais fixes s'ajoutent des « frais proportionnels », qui sont essentiellement les dépenses de combustible, dans les centrales thermiques.

Tandis que le coût de l'énergie hydraulique n'est pratiquement constitué que du

premier de ces termes, le coût de l'énergie thermique est au contraire fortement influencé par le second : plus précisément, dans les centrales thermiques modernes, la part du combustible est d'environ 75 % et l'incidence des charges fixes 25 %.

L'énergie nucléaire semble devoir se situer dans une position intermédiaire. Il y a un grand espoir en effet d'arriver à terme à un coût de combustible nettement plus bas que celui des centrales à charbon, à fuel ou à gaz. Mais il semble bien aussi que les dépenses de construction se maintiendront au-dessus de celles des centrales thermiques. Actuellement, les coûts de construction par kW installé sont de 2 à 3 fois plus élevés que dans



n nelle et une centrale nucléaire

et vapeur d'autre part, parcourent des circuits fermés entièrement distincts les uns des autres. Le gaz (gaz carbonique) sous pression circule autour des éléments de « combustible » répartis dans le cœur du réacteur, où il est porté à haute température et vient céder sa chaleur aux divers éléments du circuit eau-vapeur qui se trouvent dans l'enceinte de l'échangeur de température : surchauffeurs, évaporateurs et économiseurs.

le thermique classique, et les dépenses en matière fissile sont aussi généralement plus élevées. Nulle part au monde, sauf peut-être à la base de Thulé dans le Nord du Groenland, où les frais d'acheminement du fuel sont énormes, il n'existe actuellement de centrales nucléaires produisant une énergie meilleur marché que celle des autres centrales classiques. Mais l'enjeu est si important, la conviction est si ferme que le progrès ne peut provenir que de l'expérience, que partout dans le monde les chantiers s'ouvrent et les projets s'élaborent. Partout l'objectif est le même : rechercher à la fois une baisse des coûts de construction et des dépenses en matière fissile. C'est par rapport à ce double

objectif que nous examinerons les diverses réalisations en cours dans le monde, en Europe et spécialement en France.

L'incertitude quant à la meilleure technique d'utilisation de l'énergie nucléaire est visible dans le fait que de très nombreuses variétés de réacteurs sont construites dans le monde⁽¹⁾.

Ils se différencient en deux grandes familles : — les réacteurs à neutrons lents encore appelés « réacteurs thermiques », où la réaction de fission est obtenue par le choc d'un neutron lent sur un noyau d'uranium ;

(1) On suppose connus les phénomènes physiques qui servent de base aux techniques actuelles d'utilisation de l'énergie nucléaire. Il suffit d'ailleurs de se reporter au numéro hors-série de Science et Vie sur l'Énergie Atomique.

— les réacteurs à neutrons rapides, où la réaction de fission est obtenue avec un neutron de haute énergie.

Réacteurs « thermiques »

La réaction recherchée ayant lieu avec un neutron lent, il faut ralentir les neutrons de haute énergie provenant de la fission en leur faisant traverser un « modérateur ». Les divers réacteurs de cette famille diffèrent par la nature de ce modérateur, par celle du fluide extracteur de chaleur, par la structure interne du réacteur et par la nature du combustible employé.

Parmi les nombreuses possibilités les suivantes paraissent prometteuses et sont l'objet de réalisations :

- les réacteurs à eau sous pression,
- les réacteurs à eau bouillante,
- les réacteurs à modérateur et réfrigérant organiques,
- les réacteurs homogènes aqueux,
- les réacteurs à refroidissement par gaz,
- les réacteurs à eau lourde.

Eau sous pression et eau bouillante

Les réacteurs à eau sous pression ont pour eux la quantité d'expérience déjà acquise dans ce domaine. Les réacteurs qui équipent les sous-marins atomiques américains en service appartiennent à cette catégorie ainsi que ceux des centrales nucléaires importantes de Shippingport et de la Yankee Atomic Electric à Rowe (Massachusetts). Ils ont déjà fait amplement la preuve de la validité de cette solution.

Les réacteurs à eau bouillante ont, eux aussi, prouvé qu'ils pouvaient être utilisés valablement dans les centrales nucléaires de grande puissance. Celle de 180 MW (180 000 kW) électriques de Dresden est particulièrement intéressante. Les constructeurs de ce type de réacteurs estiment que la construction d'une centrale de 300 MW environ peut dès maintenant être entreprise, et que, dans des zones américaines où le prix de l'énergie classique est élevé, ils peuvent approcher de la compétitivité. Le travail de perfectionnement doit porter sur la surchauffe nucléaire, c'est-à-dire sur les procédés permettant d'augmenter notablement, au moyen du réacteur lui-même, la température de la vapeur produite, ce qui permettrait de lui donner des caractéristiques voisines de celles de la vapeur produite dans les centrales thermiques modernes à haut rendement.

Réacteurs organiques

Les réacteurs à modérateur et réfrigérant organiques sont considérés comme susceptibles de fournir une solution très avantageuse. Ils permettent en effet, pour des pressions inférieures, des températures plus élevées que les réacteurs à eau à cause des faibles tensions de vapeur des liquides employés. De plus, ils ne soulèvent pas de problèmes de corrosion. Ils bénéficieraient ainsi de coûts de fabrication relativement bas. Malheureusement, les liquides organiques actuellement employés se décomposent sous l'effet des rayonnements, formant des boues ou des goudrons qui obligent à des remplacements coûteux des matières organiques. L'effort essentiel à faire pour améliorer ce type de réacteur porte sur la tenue du liquide adéquat sous rayonnement.

Réacteurs homogènes

Les réacteurs homogènes aqueux, dans lesquels le combustible se présente sous forme d'une solution de sulfate d'uranyl dans de l'eau, offrent des avantages considérables puisqu'ils ne nécessitent pas de frais de préparation importants du combustible (pas de gainage), et qu'ils sont au premier abord d'une grande simplicité. Leur contrôle est facile car ils sont doués d'un pouvoir autorégulateur très important. Ils sont en outre susceptibles de fonctionner en « breeders » (produisant plus de combustible nucléaire qu'ils n'en consomment). Cependant, ils posent d'autres problèmes : d'une part, on doit traiter chimiquement en permanence la solution pour en extraire les produits de fission qui s'y trouvent mêlés puisqu'on ne les retient pas prisonniers à l'intérieur d'une gaine comme dans tous les autres types de réacteurs ; d'autre part, cette solution est très corrosive, ce qui est particulièrement gênant.

La centrale E.D.F. de Chinon →

Cette centrale nucléaire est en construction à Avoine, près de Chinon, dans l'Indre-et-Loire. Le réacteur E.D.F.1 (dont la position est indiquée par A), est déjà très avancé et fournira 60 000 kW électriques. Une fois terminée, l'installation sera enveloppée dans une sphère de 55 m de diamètre. E.D.F.2 (B) de 175 000 kW entrera en service environ un an après E.D.F.1. C marque l'emplacement d'E.D.F.3, de 375 000 kW dont les travaux viennent de commencer. Le château d'eau en D constitue une réserve pour le refroidissement des échangeurs.

D'autres inconvénients proviennent du fait que les réacteurs homogènes ne peuvent pas supporter des températures élevées et qu'en conséquence le rendement thermodynamique du cycle de vapeur associé ne peut être que médiocre. Il semble bien que, tout compte fait, ce type de réacteurs ne sera pas adopté dans des réalisations industrielles importantes avant que les travaux expérimentaux n'aient été poussés plus avant.

Tous ces types de réacteurs nécessitent de l'uranium enrichi. Ils ne peuvent en effet fonctionner avec de l'uranium naturel car la capture des neutrons dans leurs modérateurs, et en particulier dans l'eau, est trop grande pour la faible proportion d'uranium fissile (0,7 % d'uranium 235) contenu dans le métal naturel. Il en résulte un prix de combustible élevé, partiellement compensé, il est vrai,

par la possibilité de maintenir ce combustible très longtemps en service. On conçoit cependant que l'utilisation directe de l'uranium naturel puisse présenter un avantage économique certain, en même temps qu'elle simplifie les problèmes d'approvisionnement. C'est ce qui explique que deux types de réacteurs capables d'utiliser ce combustible aient été très étudiés en Europe occidentale et au Canada : le réacteur à eau lourde et le réacteur à graphite refroidi au gaz.

Réacteurs à eau lourde

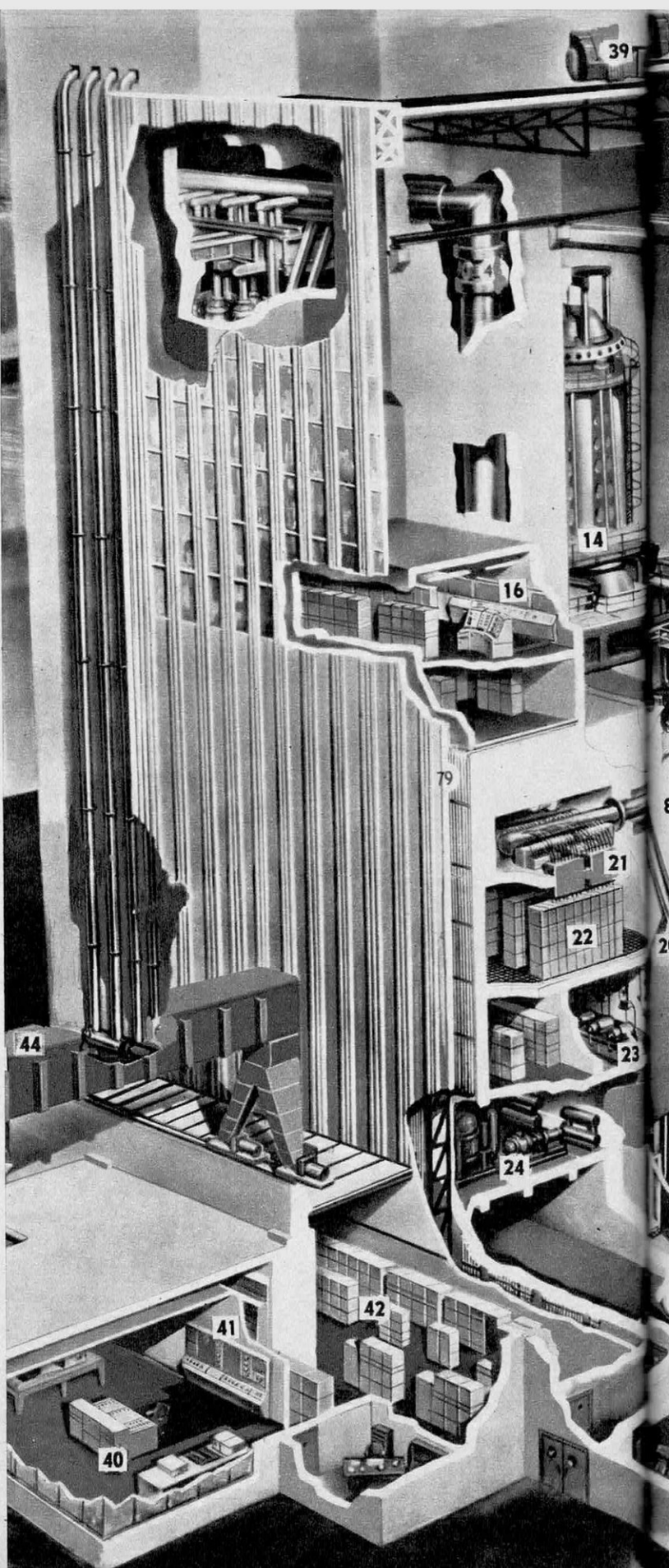
Les réacteurs à eau lourde sont sensiblement plus volumineux que les réacteurs à uranium enrichi modérés à l'eau ordinaire. Ceci est l'une des causes d'un coût d'investissement élevé, l'autre provenant du prix de l'eau

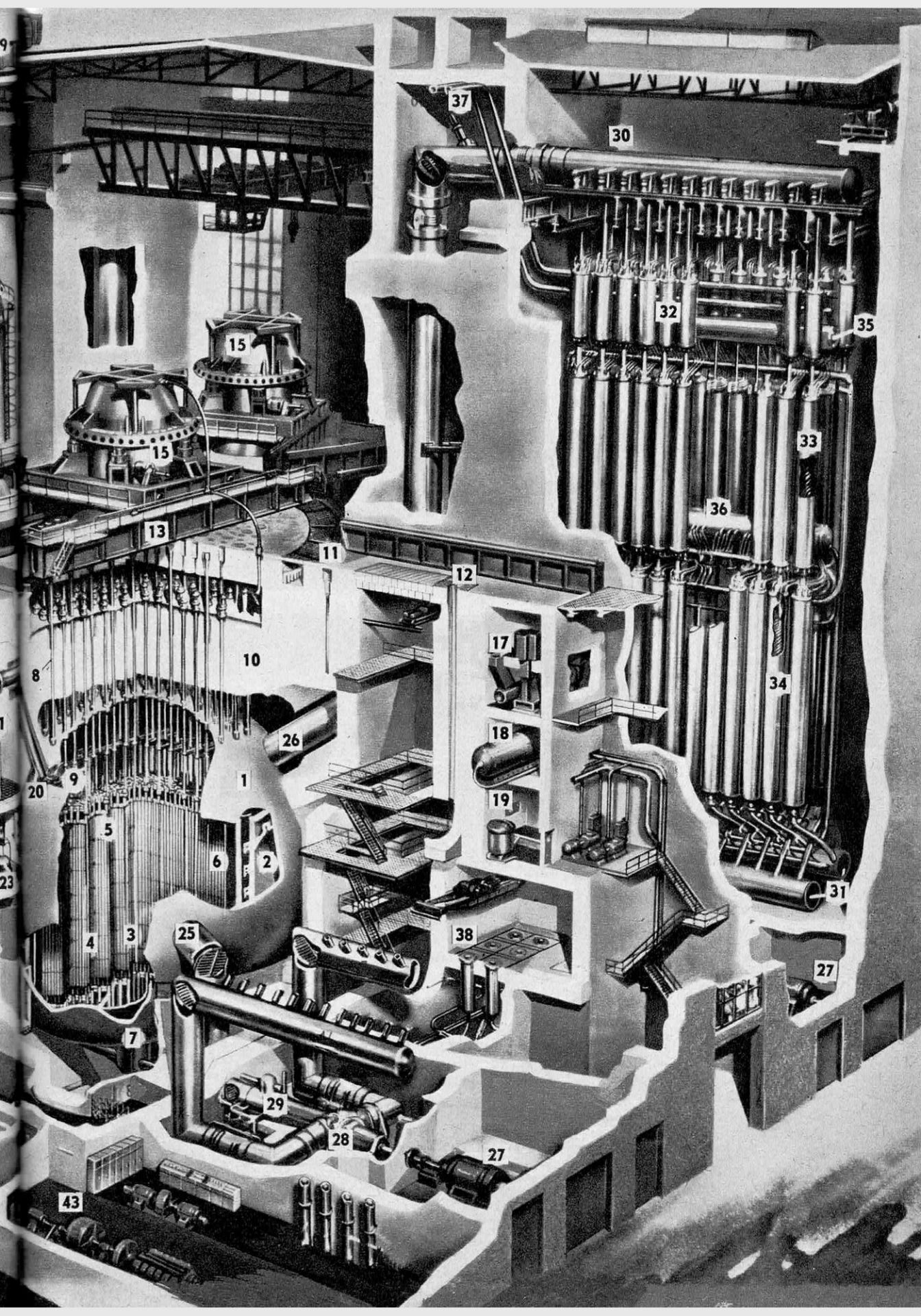
SUITE PAGE 101



La centrale nucléaire EDF-2 de Chinon

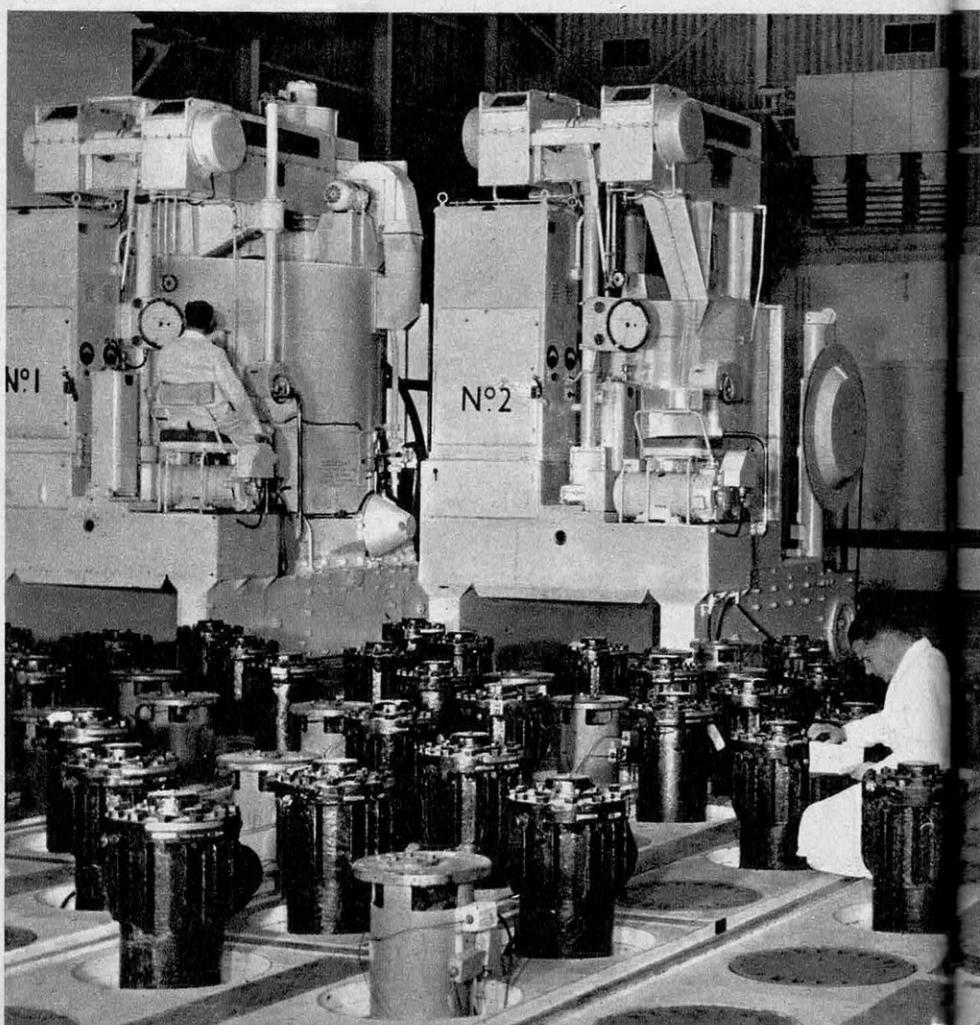
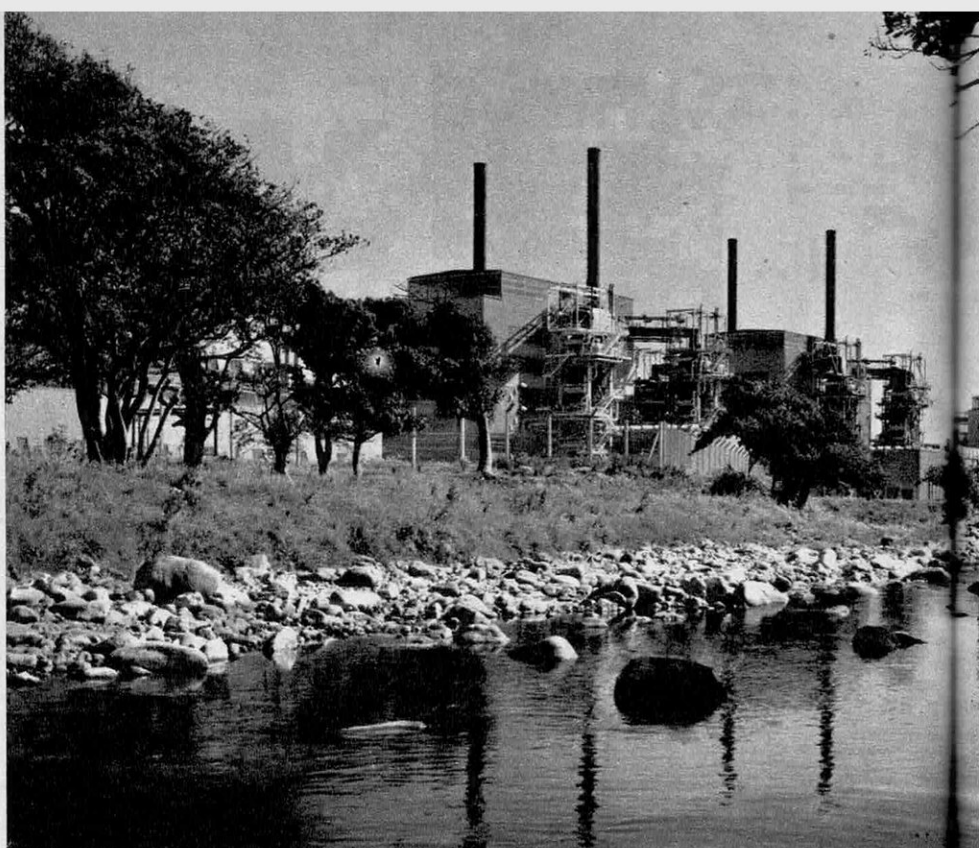
- 1 Caisson sphérique sous pression
- 2 Séparation du gaz chaud et du gaz froid
- 3 Empilement de graphite
- 4 Éléments combustibles
- 5 Plaque de lestage
- 6 Réflecteur en graphite
- 7 Cuve de récupération de débris
- 8 Puits de chargement
- 9 Barre de contrôle
- 10 Dalle de protection biologique
- 11 Puits de stockage des treuils de barres de contrôle
- 12 Puits de décontamination des bras de chargement.
- 13 Pont tournant
- 14 Machine de préparation de maintenance
- 15 Machine principale de chargement-déchargement
- 16 Salle de commande du chargement
- 17 Ventilation de la salle de décontamination
- 18 Réservoir d'alimentation en CO_2 filtré.
- 19 Salle de préparation des solutions de décontamination
- 20 Sortie des tubes de détection de rupture de gaine
- 21 Réfrigérant
- 22 Sélecteurs des détecteurs de rupture de gaine
- 23 Filtrage pour les détecteurs
- 24 Compresseurs
- 25 Entrée du CO_2 dans le réacteur
- 26 Sortie du CO_2
- 27 Moteur de la soufflante
- 28 Soufflante
- 29 Vanne
- 30 Collecteur d'arrivée du CO_2 à l'échangeur
- 31 Collecteur de sortie du CO_2 de l'échangeur
- 32 Surchauffeurs haute et basse pression
- 33 Vaporisateur haute-pression
- 34 Vaporisateur basse-pression
- 35 Ballon haute-pression
- 36 Ballon basse-pression
- 37 Collecteurs de vapeur
- 38 Filtres de CO_2
- 39 Ventilateur
- 40 Pupitre de commande de la centrale
- 41 Tableau principal
- 42 Salle d'électronique.
- 43 Groupes diesels
- 44 Portique roulant

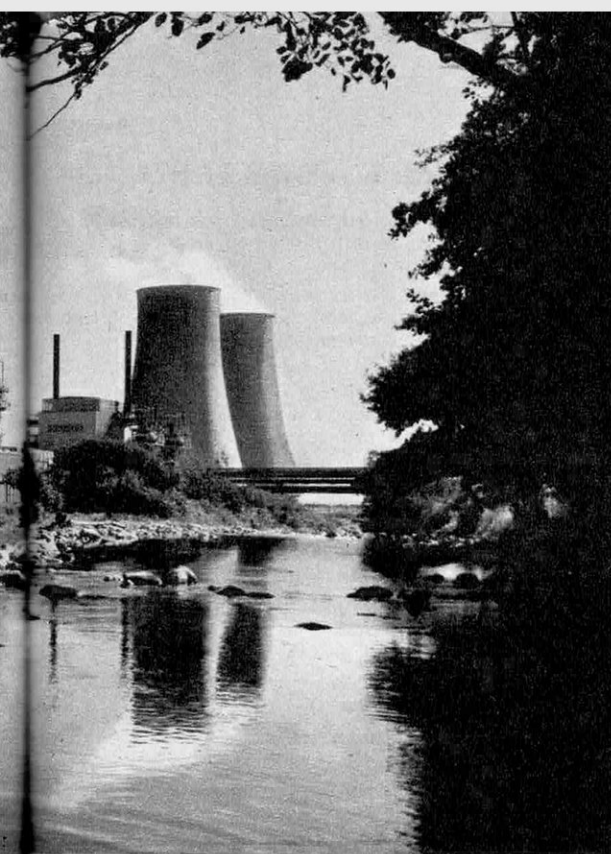




Calder Hall première centrale nucléaire anglaise

Calder Hall, sur la côte du Cumberland, est la «souche» de la première famille de centrales commerciales d'énergie nucléaire de Grande - Bretagne. Elle comprend deux ensembles de deux réacteurs chacun, à uranium naturel, modérateur en graphite et refroidissement par gaz carbonique. On voit ci-contre, sous la vue générale, l'étage de chargement d'un des réacteurs avec deux machines pour la mise en place des barreaux d'uranium et, à l'extrême gauche une machine de déchargement. Le premier réacteur de Calder Hall a été inauguré officiellement le 17 octobre 1956. Une deuxième centrale identique, édifiée à Annan, en Écosse, est entrée en fonctionnement en 1959.





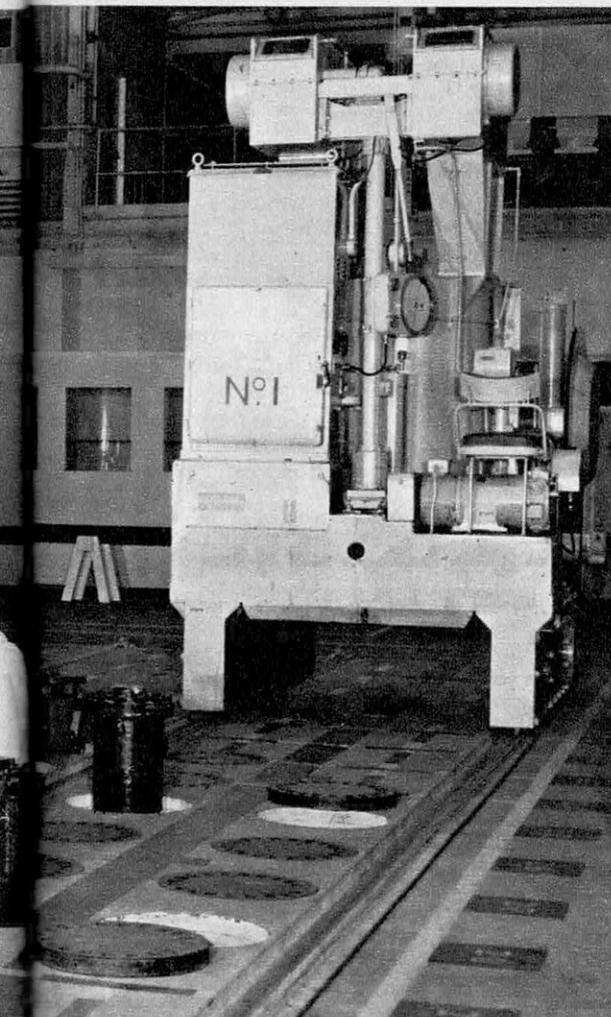
lourde. Le bilan neutronique très étroit de ces réacteurs exige pour le gainage du combustible l'emploi de métaux spéciaux tels que le zirconium ou le béryllium, et on est dans cette voie très dépendant des progrès de la métallurgie et de la technologie. Le Canada s'est spécialisé dès le début dans ce type de réacteur et travaille sur un prototype de 20 MW (NPD₂) qui va fonctionner prochainement. Une autre importante installation canadienne de 200 MW (Candu) est prévue pour 1965. La France, de son côté, prépare la construction de la centrale EL 4 de 100 MW qui sera implantée en Bretagne. Elle servira peut-être d'amorce à une filière à eau lourde et démarrera vers 1965. Sa construction sera assurée par le C.E.A. pour la partie réacteur, et par l'E.D.F. pour la partie utilisation de la vapeur et génération d'électricité.

Cette voie n'est pas négligée non plus aux États-Unis où une installation de 17 MW est en cours de construction, et où l'on étudie l'opportunité de réaliser une installation de 50 MW.

Graphite et gaz carbonique

Le fait d'avoir gardé pour la fin l'examen des réacteurs à refroidissement par gaz et modération au graphite n'est pas le signe d'un moindre intérêt. Ce sont eux en effet qui ont été spécialement étudiés et réalisés en France et en Grande-Bretagne.

Outre l'avantage essentiel de pouvoir utiliser l'uranium naturel, ce type de réacteur présente d'autres atouts qui justifiaient son choix vers 1955 comme réacteur-type de puissance dans ces deux pays. D'une part, il ne pose pas de problème d'approvisionnement en modérateur, car on sait fabriquer à un prix acceptable un graphite de bonne pureté nucléaire qui possède en même temps une tenue mécanique suffisante pour qu'un simple empilage de blocs de graphite soigneusement façonnés constitue toute la structure interne du réacteur. D'autre part, l'expérience française de P₂ à Saclay avait déjà montré que le gaz carbonique sous pression convenait comme fluide extracteur de chaleur. Le fait que la taille critique d'un tel réacteur soit élevée (correspondant à plus de 30 t d'uranium) n'est pas un inconvénient lorsqu'on recherche essentiellement une grande puissance. Enfin, on avait là un moyen massif de production de plutonium qui pouvait pallier l'absence de production européenne d'uranium très enrichi, et permettre l'amorçage des filières à neutrons rapides dont il sera question plus loin. On savait par contre



que le refroidissement par gaz entraîne le gaspillage d'une partie notable (10 à 20 %) de l'énergie produite en énergie de soufflage du gaz à travers les canaux du réacteur. Pour améliorer le rendement, il faut augmenter la pression interne, ce qui favorise les échanges de chaleur, permet d'élever la température et réduit la puissance de soufflage nécessaire. D'où la nécessité de construire de très grands caissons capables de tenir des pressions internes de 15 à 25 kg/cm². Les perfectionnements que l'on envisage concernent le combustible : métallurgie, gainage, mise au point d'alliages nouveaux, emploi d'oxydes frittés.

Les programmes en Grande-Bretagne et en France

Vers 1955, la Grande-Bretagne prenait conscience des difficultés qui la menaceraient si elle devait compter sur les seuls combustibles classiques pour satisfaire ses besoins croissants en énergie. De sérieux problèmes de main-d'œuvre notamment se posaient pour l'extraction de son charbon et cette situation ne pouvait apparemment pas s'améliorer dans le futur, compte tenu de l'augmentation sans cesse croissante des besoins. L'énergie nucléaire apparaissait donc à point nommé pour prendre la relève. La décision fut prise, et un « Livre Blanc » publié en 1955 par le Gouvernement, annonça un programme de construction de centrales nucléaires qui étonna beaucoup les spécialistes par son ampleur. Il s'étendait sur une dizaine d'années et prévoyait à cette époque la réalisation d'une douzaine de centrales d'une puissance totale de 1 500 à 2 000 MW. Il y était proposé de reproduire à plusieurs exemplaires, en les améliorant progressivement, des réacteurs à uranium naturel modérés au graphite et utilisant du gaz carbonique sous pression.

La France, en 1955, n'était pas aussi inquiète de son avenir énergétique que la Grande-Bretagne; sans être aussi richement pourvue de ressources naturelles que certains pays privilégiés comme les États-Unis ou le Canada, elle satisfaisait par ses propres moyens à une bonne partie de ses besoins. Le Commissariat à l'Énergie Atomique, créé en 1945, avait, par ses études et ses recherches expérimentales et industrielles, enrichi le pays des connaissances et des moyens nécessaires à la mise en route d'un type de centrale très semblable à celui adopté par les Anglais. La France s'apprête donc à engager sans précipitation inutile son industrie dans la voie nucléaire en prévoyant la réalisation de prototypes successifs, la répétition d'un même

La centrale de Dresden U.S.A. →

C'est la plus puissante des centrales nucléaires américaines, développant 180 000 kW électriques. Elle a été construite par la General Electric pour la Commonwealth Edison et se trouve au bord du fleuve Illinois, à 80 km au sud-ouest de Chicago. Les travaux ont commencé en mars 1957 et le réacteur, à uranium enrichi et eau bouillante, est devenu critique en octobre 1959. La centrale fonctionne à plein rendement depuis le milieu de 1960. Les ingénieurs estiment maintenant que sa puissance doit pouvoir être portée à 270 000 kW.

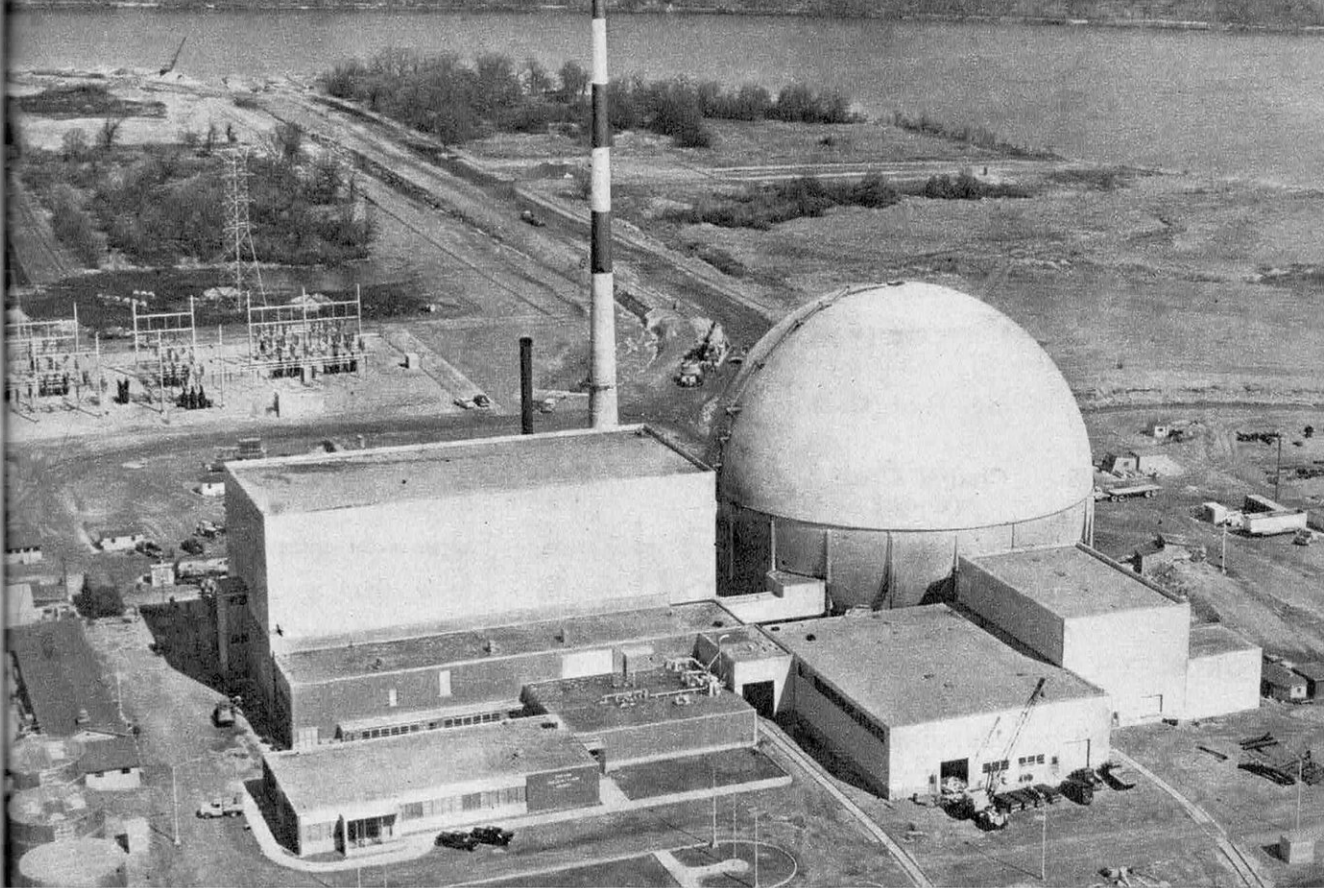
réacteur ne devant être envisagée que lorsque l'on approcherait de la compétitivité. Un programme fut donc mis sur pied, qui devait conduire à une puissance installée en réacteurs nucléaires de 850 000 kW électriques vers 1965. C'est ce programme qui est en cours de réalisation et tout porte à croire qu'il sera à peu près exactement tenu, malgré les incidences psychologiques d'ailleurs contradictoires de deux événements successifs : la crise de Suez et la découverte du gaz de Lacq, puis du pétrole et du gaz sahariens.

Les Américains sont décidés à explorer à leur tour cette voie avec un premier réacteur expérimental actuellement en construction à Oak-Ridge. Une centrale nucléaire de ce type sera également construite à Peach Bottom.

Cependant, les réacteurs américains de ce type, actuellement envisagés, diffèrent des réacteurs français et anglais par le fait qu'ils utilisent de l'uranium enrichi qui leur permet d'employer des matériaux de structure plus gourmands en neutrons, mais grâce auxquels on peut atteindre des températures plus élevées et de meilleurs rendements thermodynamiques : la vapeur pourrait ainsi être surchauffée dans le réacteur et acquérir des qualités comparables à celles de la vapeur des centrales thermiques classiques. D'autre part, le gaz de refroidissement choisi est l'hélium et non le gaz carbonique.

Réacteurs à neutrons rapides

Cette deuxième grande famille diffère très profondément des filières précédentes. Du fait que la réaction nucléaire utilisée est la fission par neutrons rapides, elle exige un combustible très enrichi : uranium 235 des usines de séparation isotopique, ou plutonium, sous-produit des réacteurs thermiques. Le meilleur réfrigérant est alors le métal liquide : sodium ou eutectique sodium-potassium. Celui-ci est neutroniquement acceptable, présente d'excellentes propriétés



d'échange de chaleur et a une très faible tension de vapeur, ce qui permet de travailler à basse pression même pour de très hautes températures. Tout ceci permet d'atteindre une densité de puissance au litre très élevée qui se mesure en centaines de kW par litre, alors que, dans les réacteurs à graphite et gaz carbonique, elle est de quelques kW par litre. Grâce à ces mêmes qualités, on peut espérer atteindre des températures et des rendements thermodynamiques élevés, semblables à ceux des meilleures centrales thermiques actuelles. Enfin, moyennant une géométrie convenable, le taux de conversion peut dépasser 1, c'est-à-dire que la quantité de matière fissile créée à partir de l'uranium 238 placé à la périphérie est supérieure à la quantité usée. Ce type de réacteur a donc de belles chances dans la course au réacteur économique, à condition que soient maîtrisées les grandes difficultés technologiques liées à l'utilisation du sodium à haute température.

Le plus important réacteur à neutrons rapides et refroidi au sodium actuellement construit est celui de la centrale Enrico Fermi de la Detroit Edison Co. Il est situé à Monroe dans l'état de Michigan et doit commencer à fonctionner prochainement. Sa puissance sera de 100 MW électriques. On pourra, grâce à lui, obtenir des indications sur des

performances d'un combustible constitué d'un alliage d'uranium et de molybdène, expérimenter des cycles de combustibles, et mieux connaître la physique de ce type de réacteur, toutes choses indispensables pour son développement ultérieur.

D'autres installations américaines expérimentales sont en cours d'équipement.

La Grande-Bretagne, qui ne possède guère de ressources naturelles en combustible nucléaire, est particulièrement intéressée par le taux de conversion qui permet de fabriquer plus de matière fissile qu'on n'en fournit au départ. Elle a construit à Dounreay un prototype de réacteur-breeder à neutrons rapides de 15 MW électriques refroidi par sodium et dont la construction a été achevée l'année dernière. Le plutonium qui doit normalement entrer dans la composition de son noyau a été, pour la première charge, remplacé par de l'uranium enrichi. Il faudra du temps pour mettre au point les problèmes techniques particuliers posés par ce type de réacteur.

La France a décidé également de construire un prototype de réacteur rapide refroidi au sodium. Il portera le nom de « Rapsodie » (RAPide-SODium). Il sera installé à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Sa puissance sera de 10 MW mais ne sera pas utilisée à faire

Les centrales nucléaires en service

NOM	SITE	DATE DE 1 ^{re} DIVER- GENCE	PUISSANCE ÉLECTR. (EN MW)	TYPE DE RÉACTEUR
G1	Marcoule (F.)	1956	5	U naturel, graphite, air
G2 - G3	Marcoule (F.)	1958-59	54 (2 r.)	U naturel, graphite, gaz carbo- nique
CALDER HALL	Calder Hall (G.-B.)	1956-58	140 (4 r.)	U naturel, graphite, gaz carbo- nique
CHAPEL CROSS	Chapel Cross (G.-B.)	1958-59	140 (4 r.)	U naturel, graphite, gaz carbo- nique
APS-1	Moscou (U.R.S.S.)	1954	5	U enrichi, graphite, eau
TROITSK	Sibérie (U.R.S.S.)	1958-60	600 (6 r.)	U naturel, graphite, eau
VORONEZH	Voronezh (U.R.S.S.)	1960	196	U enrichi, eau sous pression
SHIPPINGPORT	Shippingport (U.S.A.)	1957	60	U naturel et enrichi, eau sous pression
APPR	Fort Belvoir (U.S.A.)	1957	2	U enrichi, eau sous pression
YANKEE ATOMIC	Rowe (U.S.A.)	1960	110	U enrichi, eau sous pression
DRESDEN	Dresden (U.S.A.)	1959	180	U enrichi, eau bouillante
BR-3	Mol (Belgique)	1960	11	U enrichi, eau sous pression
KAHL	Kahl (Allemagne)	1960	15	U enrichi, eau sous pression

tourner un groupe turbo-alternateur. Sa construction a déjà été commencée et l'installation devrait fonctionner en 1963.

Les installations existantes et les programmes en cours

En faisant abstraction des réacteurs de recherches ou des réacteurs expérimentaux spécialement construits pour préparer la voie aux réacteurs des centrales nucléaires proprement dites, on compte à peu près 65 installations en cours de fonctionnement ou de réalisation. Celles qui sont effectivement en service à l'heure actuelle sont encore peu nombreuses, et le tableau ci-dessus en donne la liste.

Il serait beaucoup plus compliqué d'entrer dans le détail des programmes en cours car de nombreux pays se sont engagés dans la voie nucléaire. On peut cependant citer :

— la Grande-Bretagne qui vise l'installation de 4 000 MW environ pour 1966-1967 et se place en tête des pays utilisateurs de

l'énergie nucléaire. A la fin de 1960, son programme comptait la construction de 23 réacteurs (dont 8 en exploitation) totalisant 3 300 MW.

— les États-Unis qui viennent ensuite quant à la puissance avec 1 500 MW de centrales dont la construction est en cours ou a été décidée.

— l'U.R.S.S. dont on ne connaît le programme que par regroupement toujours incertain d'informations fragmentaires, semble se placer à un niveau à peu près correspondant, et il semble qu'un grand nombre de types de réacteurs différents y soient essayés, comme aux U.S.A.

— la France qui se place au quatrième rang avec ses installations actuelles de Marcoule totalisant près de 60 MW, les centrales de Chinon (E.D.F. 1, E.D.F. 2 et E.D.F. 3 dont les puissances seront respectivement de 60, 170 et 375 MW), et la centrale à eau lourde E.L. 4 de 100 MW. On arrive ainsi à un total de 770 MW auxquels il conviendrait d'ajouter la moitié de la puissance de la

Centrale de Chooz de 242 MW qui sera installée dans les Ardennes et que l'Électricité de France et la Société Belge « Centre et Sud » ont décidé de construire en commun dans le cadre de l'accord U.S.A.-EURATOM qui favorise l'achat de réacteurs américains en vue de leur importation en Europe.

— L'Italie a également pris une option importante sur l'utilisation de l'énergie nucléaire en décidant l'achat d'un réacteur du type Calder Hall de 200 MW pour la centrale de Latina et de deux réacteurs des types les plus en faveur aux États-Unis : un réacteur bouilleur de 150 MW pour la centrale de la SENN sur le Garigliano et un réacteur « pressurisé » de 160 MW pour la centrale de la SELNI près de Milan. Ce qui portera à 510 le total de la puissance nucléaire installée dans ce pays vers 1963.

— le Canada poursuit sa route dans la technique des réacteurs à uranium naturel et à eau lourde sans engager à l'avance de programme massif, un seul gros réacteur de 220 MW étant prévu pour 1965.

Perspectives d'avenir

On peut considérer qu'à l'heure présente on dispose déjà d'une technique suffisamment au point pour produire industriellement de l'énergie nucléaire. Mais le prix de revient de cette énergie est plus élevé que celui auquel nous sommes habitués avec les sources d'énergie classiques utilisées jusqu'à maintenant. Le coût de construction actuel des centrales nucléaires est 2 à 3 fois plus élevé, à puissance égale, que celui des centrales thermiques modernes. On peut trouver à cela trois raisons :

1^o Les techniques qu'on peut considérer comme actuellement au point pour le développement industriel ne sont peut-être pas les meilleures, et on peut espérer que parmi d'autres, plus raffinées mais encore à l'état de prototypes ou de projets, on en trouvera une qui les détrônera avantageusement. Cette opinion justifie les efforts qui sont faits dans de nombreuses voies différentes mais ce serait, au moment présent, faire un pari que de désigner l'une ou l'autre comme gagnant probable.

2^o Les techniques actuellement au point sont trop lourdes, ce qui est bien naturel parce qu'on a encore très peu d'expérience de ce genre de réalisations et que l'on est toujours porté dans ces conditions à multiplier les précautions de tous ordres. Les progrès et améliorations qui seront inévitablement apportés à l'occasion de chaque réalisation

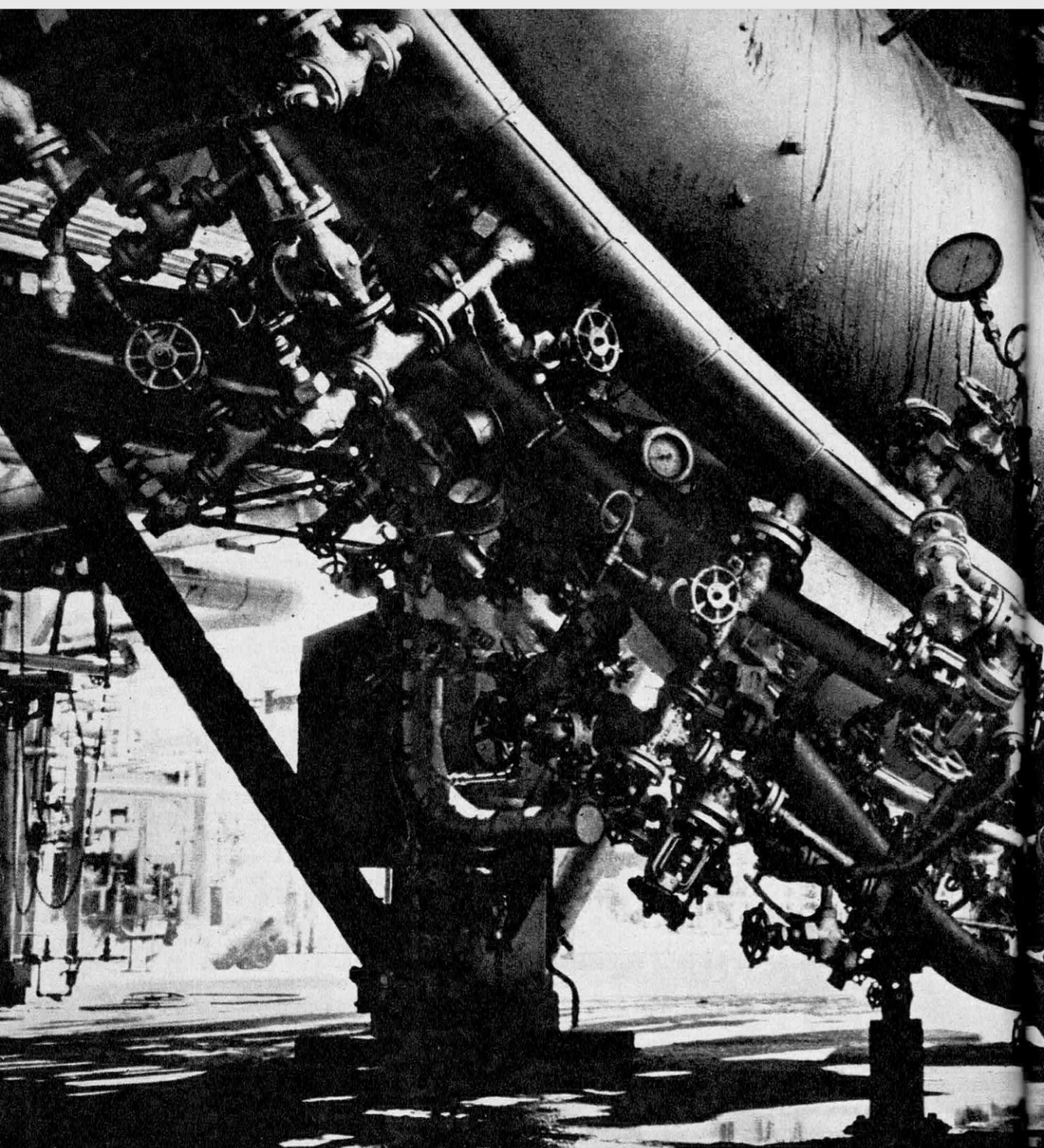
nouvelle conduiront assez rapidement au modèle dépouillé de toute complication inutile et par conséquent moins coûteux.

3^o Les performances actuellement réalisables sont insuffisantes. La course est engagée pour augmenter les températures à l'intérieur du réacteur, ce qui permettra d'améliorer le rendement total des installations. Un bon nombre de prototypes à haute température sont en cours de construction : A.G.R., ZENITH, DRAGON, H.T.G.R., etc. pour préparer cette amélioration. D'autre part, la puissance unitaire des réacteurs est partout en augmentation, car c'est un élément favorable à l'abaissement du prix de revient par kilowatt installé.

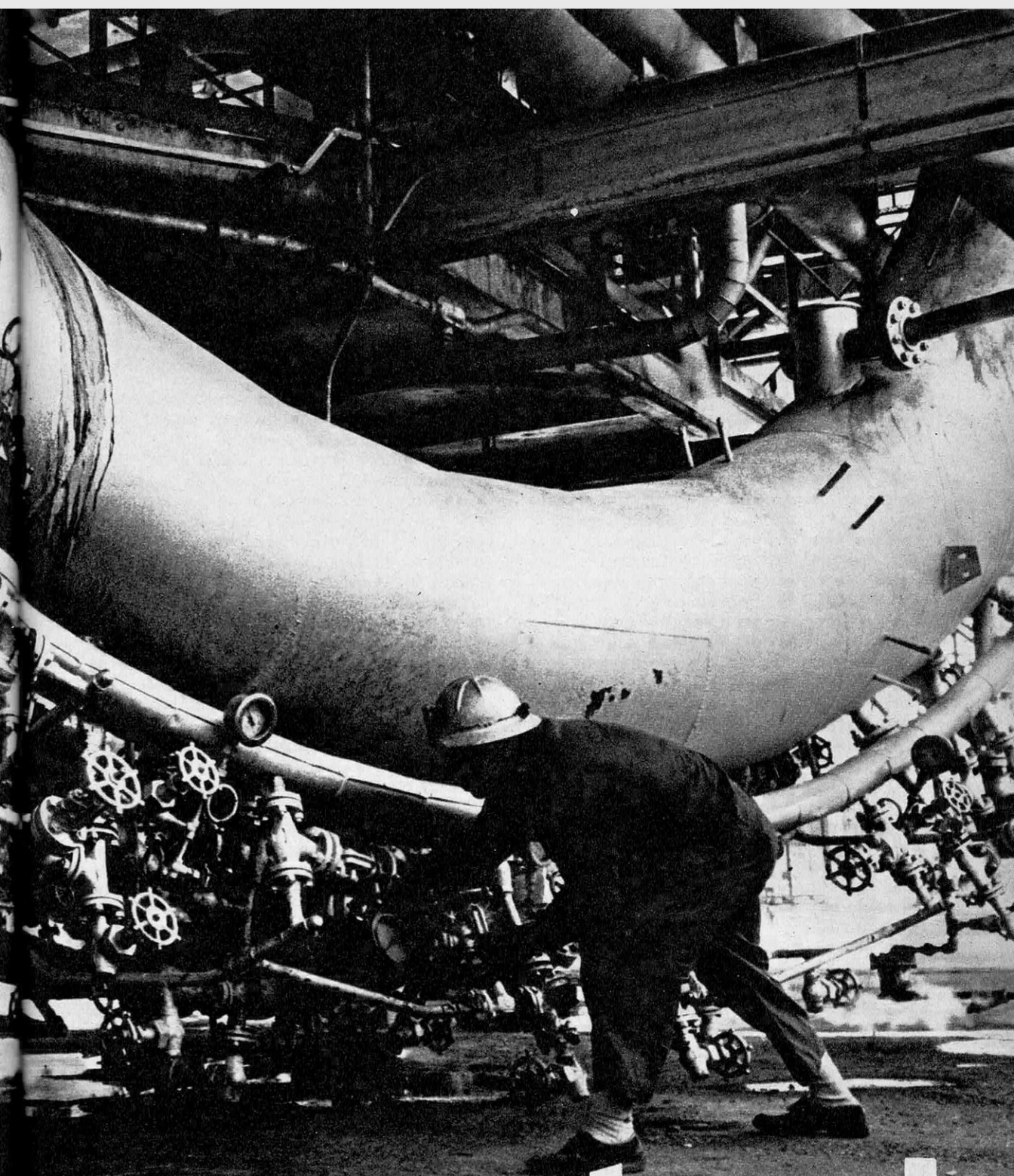
On peut comparer le coût actuel des centrales nucléaires à celui de certaines centrales hydrauliques, parfaitement rentables. On pourrait admettre de payer ce prix élevé de construction si les dépenses d'exploitation et de combustible étaient vraiment minimes comme c'est le cas pour l'hydraulique; malheureusement, bien que la théorie soit pleine de promesse de ce côté là, on ne sait pas encore épuiser suffisamment les possibilités des combustibles nucléaires pour qu'il en soit ainsi. La difficulté est d'ordre technologique et les procédés susceptibles de la résoudre sont plus nombreux lorsqu'on a affaire à du combustible enrichi qu'à de l'uranium naturel. Par contre, le premier est plus coûteux que le second et on n'est actuellement pas en mesure de prédire lequel des deux donnera la meilleure solution économique. Il est certain que l'avenir de l'énergie nucléaire, ou du moins la date à laquelle elle pourra concurrencer à coup sûr les énergies classiques, dépend étroitement des progrès que l'on réalisera dans la technologie des combustibles d'une part, et dans les cycles que l'on pourra organiser pour en tirer le maximum de profit dans les réacteurs d'autre part. Les réacteurs-breeders sont particulièrement intéressants à ce point de vue.

Nous nous sentons vivre l'âge atomique, mais à y bien regarder, il n'y a guère plus d'une dizaine d'années que l'industrie s'est engagée dans l'énergie atomique. Or nous entrevoyons déjà le moment où une technique sera suffisamment au point pour entrer massivement dans sa phase de développement. Dix ans représentent une période vraiment courte, même comparée au temps qu'il a fallu à nos techniques modernes les plus dynamiques comme l'automobile, l'aviation, l'électronique, pour parvenir au stade de développement que nous leur connaissons.

Un tel résultat déjà acquis en si peu de temps ne peut que nous donner confiance.



Pétrole et



gaz naturel



L'ÉVOLUTION des diverses sources d'énergie au cours du dernier siècle a été marquée par la rapidité avec laquelle le pétrole a pris parmi elles une place de plus en plus importante.

Quel chemin parcouru depuis le puits de Drake creusé en 1859 ! Quelle place « l'or noir » n'a-t-il pas prise dans la vie de l'homme moderne !

Il était certes connu dès la plus haute antiquité, mais, il faut arriver à des années relativement proches pour considérer que le pétrole est autre chose qu'un moyen de calfatage des bateaux plats, comme au temps des Phéniciens ou des Carthaginois, ou que l'onguent soignant les blessures ou soulageant les rhumatismes, comme au Moyen Âge.

C'est seulement à la fin du ^{xv}^e siècle qu'on soupçonne ses propriétés lubrifiantes, et seulement en 1854 que deux pharmaciens galiciens révèlent ses propriétés éclairantes. Cette huile mystérieuse, après un traitement sommaire, allait tirer de l'obscurité nombre de grandes villes et apporter plus de confort à leurs habitants. Ce fut un engouement général pour le « pétrole lampant » et il fallut songer à répondre rapidement à l'accroissement de la demande : une véritable industrie venait de naître qui allait enfanter bien d'autres. Alors Drake survint et ce fut l'épopée de l'or noir, présente à tous les esprits.

La naissance d'une grande industrie

Jusque vers 1900, les raffineurs, producteurs de pétrole lampant, avaient beaucoup de mal à écouler l'essence ; cette situation allait être complètement bouleversée par la naissance et l'essor foudroyant du moteur à explosions.

L'industrie du pétrole prend sa physionomie nouvelle sous l'influence de trois facteurs principaux :

— L'apparition de l'automobile, sa fabrication en série et la naissance de l'aviation.

— Les inventions du moteur diesel et du procédé de chauffage par brûleurs qui venaient à point nommé pour permettre d'utiliser des produits de distillation dont on ne savait que faire jusque-là.

— La guerre de 1914-1918 qui va précipiter l'utilisation de moyens mécaniques et provoquer des besoins considérables de produits pétroliers.

Le rôle du pétrole a été à un tel point décisif au cours des opérations militaires que la France dut reconsidérer toute sa politique pétrolière et décida de mettre tout en œuvre pour implanter sur son sol une industrie du

raffinage. Elle demandera aussi, lors de l'Armistice de 1918, des droits sur la Turkish Petroleum, et 23,75 % des parts de la nouvelle société, appelée Irak Petroleum Company, lui seront cédées.

Ce bref rappel historique nous a conduits au moment où les temps héroïques du pétrole sont révolus et font place à ce que l'on peut sans exagération appeler l'ère du pétrole.

Quelle place occupe-t-il aujourd'hui dans le monde ?

Le pétrole dans le monde en 1960

La production mondiale de pétrole a dépassé en 1960 le milliard de tonnes.

Son évolution au cours de ces trois dernières années mérite un examen détaillé. L'année 1958 avait marqué, par rapport à 1957, un net ralentissement de la production, l'accroissement total s'élevant à 3 % seulement et se trouvant surtout localisé en U.R.S.S. et au Moyen-Orient. Aux États-Unis, au Vénézuéla, au Canada, les quantités extraites accusaient au contraire un sensible fléchissement.

En 1959, on note une reprise importante de la production qui dépasse de 7,6 % celle de 1958. L'U.R.S.S. enregistre à nouveau un fort pourcentage d'augmentation (plus de 14 %), mais l'accroissement de sa production en volume est cependant à peine supérieur à celui des États-Unis (environ 16 millions de tonnes) où se sont nettement fait sentir les effets du contrôle des importations institué au début de l'année. Le progrès est également sensible dans presque tous les pays producteurs. Ainsi ces deux années n'ont apporté aucune modification notable dans la répartition des principales zones de production, les trois premiers pays producteurs demeurant les États-Unis, le Vénézuéla et l'U.R.S.S. Toutefois, jusqu'à 1959, la part relative de l'U.R.S.S. s'accroît, celle du Vénézuéla demeure à peu près stable et celle des États-Unis diminue.

La production des États-Unis en 1960 continue d'être freinée par le strict contrôle des États soumis au rationnement : le nombre de jours de production pour les puits rationnés au Texas a été de 104 en 1960, contre 126 en 1959 et 161 en 1957. La production américaine ne représente plus maintenant que 33 % de la production mondiale totale et 39 % de celle du monde libre, contre respectivement 52 et 57 % en 1950.

Phénomène important à remarquer en ce qui concerne le Vénézuéla, c'est la position moins favorable qu'occupe ce pays sur le marché mondial du pétrole. Cette situation

résulte de mesures gouvernementales réduisant les remises aux revendeurs et d'événements tels que la restriction des importations imposées aux États-Unis, principal marché du Vénézuéla, et la diminution et la perte de marchés tels que ceux de l'Argentine, qui a fait un gros effort de production, ou de Cuba, maintenant ravitaillée par les Russes. Certes ce pays demeure le premier pays exportateur, mais sa part dans le commerce international — actuellement d'un tiers — semble destinée à décroître encore.

Au Mexique, légère augmentation de la production en 1960, de 5,7 %, notamment en raison du rendement accru des champs de Tabasco : cependant, comme aux États-Unis, le gaz naturel provoque un recul certain du pétrole.

En Argentine, l'augmentation est plus spectaculaire : 5,1 millions de tonnes en 1958, 6,3 en 1959 et 9 en 1960. La production aura presque doublé en trois ans et ce pays doit pouvoir en 1961 assurer l'équilibre production et besoins.

Malgré un progrès sensible d'une année sur l'autre, la Communauté Française (Métropole, Sahara, Gabon, etc.), n'a représenté en 1959 que 0,4 % environ du total mondial. Compte tenu de l'augmentation probable de la production des autres régions et des perspectives sahariennes actuelles, il semble que la production de « pétrole-franc » puisse atteindre 3 % du total mondial au cours des cinq prochaines années.

L'importance du Moyen-Orient

Si l'on examine l'évolution de la production non plus par pays, mais par grandes régions géographiques, l'importance croissante du Moyen-Orient apparaît nettement. Fournisseur du marché mondial pour moins de 5 % en 1940, pour 15 % en 1949, il atteint 24 % en 1959. La prééminence pétrolière du Moyen-Orient est d'ailleurs plus que confirmée par la répartition des réserves actuellement reconnues. Cette région renferme en effet 62 % des réserves du globe contre 14 % en Amérique du Nord (essentiellement aux États-Unis), 10 % en Europe orientale (essentiellement en U.R.S.S.), 7,5 % en Amérique latine (essentiellement au Vénézuéla), le surplus étant réparti dans les diverses autres régions du monde, notamment au Sahara.

La production du Moyen-Orient, qui a augmenté de 15,6 % en 1960, atteignant ainsi 267 millions de tonnes, traduit une demande accrue des pays de l'Europe occidentale, mais les fournitures croissantes du Sahara français et de la Libye, de même que la pression

Production mondiale de pétrole en 1960

(millions de tonnes)

AMÉRIQUE DU NORD

États-Unis	345
Canada	25,7
Mexique	14,5

AMÉRIQUE DU SUD

Vénézuéla	151
Colombie	8,07
Argentine	9
Trinité	6,05
Pérou	2,4
Brésil	4
Autres pays	1,805

EUROPE OCC. ET AFR. DU N.

Allemagne	5,5
Autriche	2,4
Pays-Bas	1,9
Italie	2
Communauté française	11,35
Autres pays	0,99

EUROPE ORIENTALE ET CHINE

U.R.S.S.	147
Roumanie	11,55
Autres pays	7,5

MOYEN-ORIENT

Koweït	84
Arabie séoudite	61,5
Iran	52
Irak	48
Qatar	8,3
Koweït (zone neutre)	7
Égypte	3,35
Bahrein	2,25
Autres pays	0,5

EXTRÊME-ORIENT

Indonésie	19,5
Bornéo britannique	4,65
Japon	0,5
Autres pays	1,51

TOTAL 1 051,775

exercée par le pétrole russe sur ce même marché, freineront son développement.

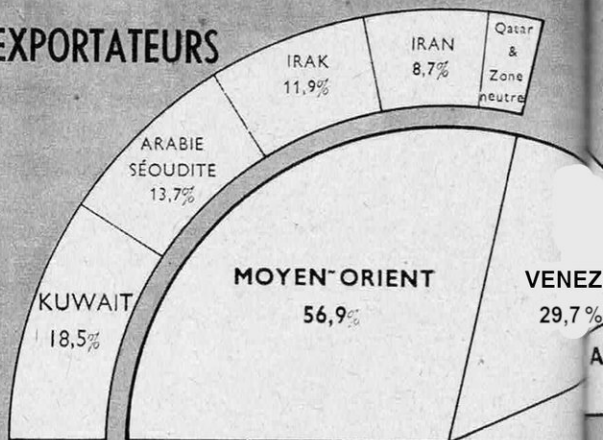
Pour les pays de la Communauté Economique Européenne (Allemagne de l'Ouest, France, Italie) la production de pétrole est passée de 2,1 millions de tonnes en 1950 à 9 millions en 1958 et 11,4 en 1960.

En Extrême-Orient, les champs nouvellement découverts à Sumatra ont permis d'atteindre 20 millions de tonnes par an.

Le pétrole soviétique

L'expansion du pétrole soviétique, en avance sur l'ambitieux plan septennal qui prévoyait une augmentation de la production de 113 millions de tonnes en 1958 à 230/240 millions de tonnes en 1965, est un des faits marquants de ces dernières années. Outre les importants champs proches de Bakou et de la zone Oural-Volga, les Russes prétendent avoir découvert une nouvelle région pétrolière à l'est de la mer Caspienne. Compte tenu des autres ressources énergétiques dont elle dispose, l'U.R.S.S. a la possibilité d'accroître son effort d'exportation de produits pétroliers. En 1959 elle a exporté 14,5 millions de tonnes, soit 11 % de sa production vers le monde libre; en 1960 ce chiffre a dû atteindre 20 millions de tonnes.

EXPORTATEURS

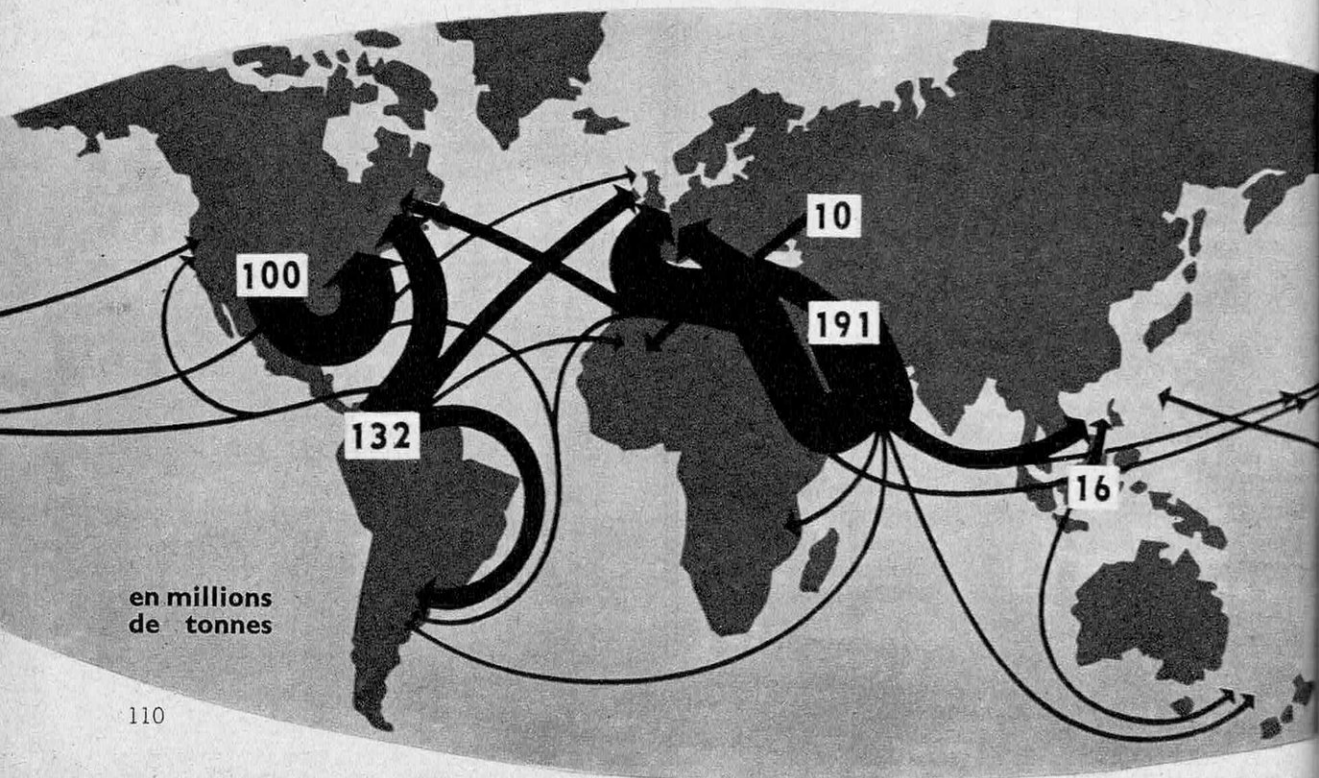


Répartition géographique des

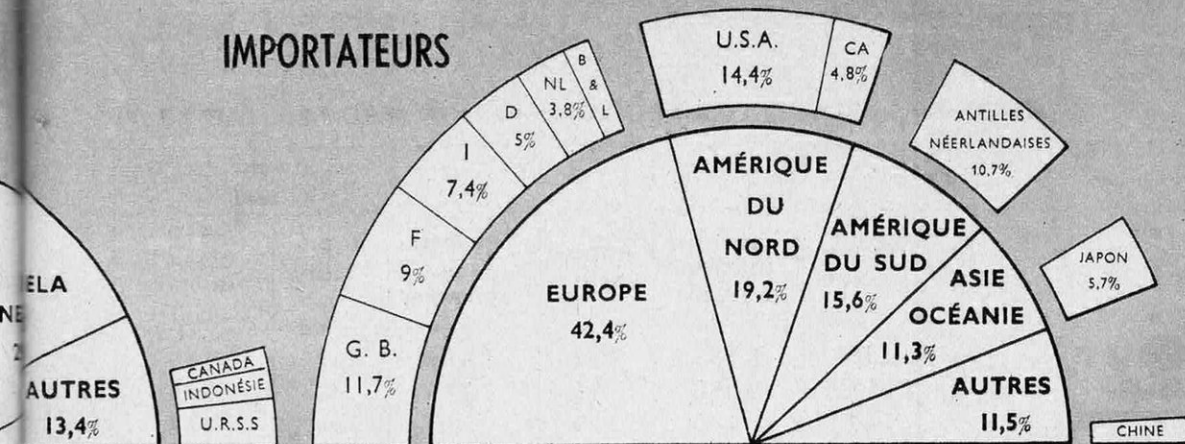
La consommation mondiale

La demande mondiale a suivi une courbe ascendante analogue à celle de la production : doublant en 10 ans, elle est passée de 10 à 20 millions de barils par jour entre 1949 et 1959. On admet que, pour l'ensemble du monde, l'augmentation de la consommation des produits pétroliers a été de 7 % par an depuis 1934. Mais cette moyenne est la résul-

Les courants maritimes d'approvisionnement pétrolier en 1958



IMPORTATEURS



principaux pays exportateurs et importateurs de pétrole brut en 1959

tante d'augmentations variables suivant les divers produits. Ainsi l'essence auto, qui représentait 15,9% du total de la demande en 1946, s'élevait à 31% en 1956. Le gas-oil et le fuel passaient de 59% à 51%.

Une telle moyenne ne donne pas non plus un reflet fidèle de la répartition à l'intérieur de certains pays. C'est ainsi qu'en Amérique du Nord, la part de l'essence (48%) est presque deux fois plus importante que dans notre hémisphère (25%), alors qu'inversement la part des fuels, qui représente dans nos régions 44%, n'y atteint que 18%.

Au cours des vingt dernières années, la consommation de produits pétroliers par habitant a doublé aux États-Unis et quintuplé au Canada. Elle a triplé pour l'ensemble des principales régions du globe.

Y a-t-il surproduction ?

Même si la forte poussée industrielle que le monde vient de connaître ne se produit pas, à la même échelle au cours des vingt prochaines années, il est certain que la tendance à l'amélioration du niveau de vie va se poursuivre. D'autre part, il est évident qu'un fort accroissement de la population de certains pays tels que l'Inde ou la Chine risque d'avoir moins d'effet qu'un léger développement de population dans un pays comme les États-Unis, où, par habitant, la consommation de pétrole est 250 fois supérieure. L'industrie pétrolière doit estimer les tendances démographiques tant des pays à niveau de vie élevé que des pays sous-développés. Il importe en effet que le raffinage fasse des prévisions à long terme.

L'arrivée sur le marché des productions de gisements nouveaux (Sahara, Libye) et l'appa-

rition des exportations soviétiques sur certains marchés ont fortement contribué au développement récent du sentiment d'une surproduction mondiale de pétrole. Il faut se garder cependant d'attacher une importance déterminante à un ensemble de faits de cette nature, car en dehors des buts politiques poursuivis par les Soviétiques, ce phénomène tient en premier lieu au caractère aléatoire de la recherche pétrolière. Cette recherche, de caractère minier, peut en effet provoquer des variations très importantes du rapport réserves-consommation, sans que soient affectés les autres éléments intermédiaires (transport — raffinage — distribution). L'appréciation portée sur les effets d'une surproduction passagère et les conséquences que l'on en tirerait trop hâtivement pourraient avoir des répercussions funestes pour l'approvisionnement pétrolier futur.

Une industrie comme celle du pétrole exige des investissements considérables et les grandes compagnies pétrolières internationales n'accompliraient pas leur mission de façon satisfaisante si elles n'engageaient pas les travaux indispensables pour entretenir, renouveler les gisements et en découvrir de nouveaux.

Au surplus, remarquons que la situation actuelle dite de « surproduction » n'a rien d'exceptionnel, car les gisements du Moyen-Orient, du Vénézuéla et d'Amérique du Nord, notamment, auraient pu produire des quantités très supérieures à celles qui étaient nécessaires pour la satisfaction des demandes immédiates.

Le pétrole, source énergétique

Entre 1900 et 1958, la production mondiale d'énergie est passée de 748 millions de tonnes

CONSUMMATION DES PRINCIPAUX PRODUITS PÉTROLIERS PAR HABITANT

	1938		1957		% d'augmentation 1938-1957	
	Popu- lation	Consom- mation unitaire	Popu- lation	Consom- mation unitaire	Popu- lation (%)	Consom- mation unitaire (%)
États-Unis	130	1 153	172	2 415	32	110
Canada	11,4	458	16,6	2 225	45	395
Amérique Latine ...	124	100	191	313	54	214
Europe occidentale .	276	109	317	372	15	240
Afrique - Extrême - Moyen-Orient	786	18	1 094	63	39	250

(Population en millions d'habitants. Consommation en litres par habitant)

d'équivalent charbon à plus de 4 000 millions de tonnes. L'évolution des parts respectives des diverses sources d'énergie a été marquée par une ascension régulière du pétrole et du gaz naturel.

Le pétrole, qui ne représentait que 3,7 % en 1900, est passé à 15 % en 1930 et 29 % à partir de 1946; le gaz naturel représente aujourd'hui près de 13 %. Cette tendance doit encore s'accroître au cours des années à venir. Personne ne retient l'hypothèse d'une diminution de la demande de pétrole.

Aussi bien les recherches de nouvelles réserves sont-elles poursuivies activement à travers le monde entier où il existe encore d'immenses bassins sédimentaires et régions sous-marines à peine prospectés, alors que, par l'emploi de procédés nouveaux, les techniciens s'attachent à accroître le rendement des gisements découverts.

Là, on injecte de l'eau chaude ou de la vapeur dans un puits pour rendre le pétrole brut plus fluide et le pomper plus aisément; ailleurs on chasse le brut de son piège par injection de gaz dans la zone imprégnée d'huile, le gaz utilisé étant généralement du gaz naturel produit en même temps que l'huile par les puits en exploitation. D'autres procédés encore plus audacieux ont été imaginés et sont actuellement à l'étude. Selon certains techniciens, la mise en œuvre de ces procédés de « double récupération » peut être comparable à la découverte d'un gisement nouveau dans un ancien, en exploitation ou même abandonné. En effet, avant la mise au point de ces procédés de « réjuvenation », certaines roches-réservoirs ne livraient que 15 à 20 % de l'huile qu'elles recélaient.

Quant à l'importance des réserves elles-mêmes, en dépit de certaines prophéties pessi-

mistes faites il y a quelques dizaines d'années, et malgré un accroissement régulier de la consommation, on estime que le rapport entre les réserves connues de pétrole et la demande ne cesse de s'améliorer. Actuellement, ces réserves représentent plus de 40 années de consommation, alors qu'en 1930 elles n'équivalaient qu'à 20 ans de la consommation de cette époque.

Ainsi le pétrole, soit comme produit énergétique, soit comme élément de base de l'industrie pétrochimique, est appelé à jouer dans les décennies qui viennent un rôle capital.

L'extension de l'industrie atomique ne saurait le chasser de multiples emplois. Plus encore, si un jour les centrales atomiques fournissent industriellement de l'énergie électrique jusqu'en des régions jusque-là déshéritées ou abandonnées, il en résultera sans nul doute, de la part de ces pays, un appel supplémentaire de confort. Pourquoi, ici encore, le pétrole ne jouerait-il pas son rôle ?

La prospection en France

La recherche pétrolière, en France métropolitaine, en Afrique du Nord et dans les territoires africains d'expression française, est une activité relativement récente, bien que le domaine à prospecter soit immense. L'inventaire des bassins sédimentaires de ces régions fait ressortir une superficie d'environ 5 milliards de kilomètres carrés susceptibles de faire l'objet de recherches pétrolières, dont 300 000 pour la France, 250 000 en Afrique du Nord, 70 000 en Afrique équatoriale, 200 000 à Madagascar, 2 000 000 au Sahara et autant en Afrique occidentale. C'est vers 1930 que les recherches ont débuté, de façon sporadique, en Métropole et, dans les autres

territoires, après 1945, date à partir de laquelle l'effort s'est peu à peu généralisé.

Si l'on excepte le gisement de Pechelbronn qui, longtemps, produisit quelque 50 000 tonnes par an, la première découverte notable en France fut celle du gisement de gaz de Saint-Marcet, en juillet 1939. Peu après, la Régie Autonome des Pétroles se voyait octroyer un périmètre de recherche de 2 400 km² dans les départements de la Haute-Garonne, de l'Ariège, des Hautes-Pyrénées et du Gers. Une loi de 1941 réserva à l'État la prospection dans le Bassin Aquitain et la même année fut créée la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine à qui fut accordé un permis de recherche dans cette même région. Une troisième société fut fondée en 1944, la Société Nationale des Pétroles du Languedoc Méditerranéen (S.N.P.L.M.) qui est devenue, depuis 1955, la Compagnie d'Exploration Pétrolière.

La coordination des recherches

Dès 1945, un organisme d'État, le Bureau de Recherches de Pétrole, chargé de coordonner les efforts de recherches et d'en assurer, au moins partiellement, le financement, fut organisé en même temps que l'Institut Français du Pétrole, qui devait former le personnel technique et promouvoir les recherches scientifiques, et la Société Nationale de Matériel pour la recherche et l'exploitation du pétrole qui eut pour rôle de centraliser les importations de matériel et la mise en œuvre de fabrications françaises. De nouvelles sociétés sont apparues, dont l'activité s'est de plus en plus orientée vers les territoires africains, où la mise en valeur a été rapide.

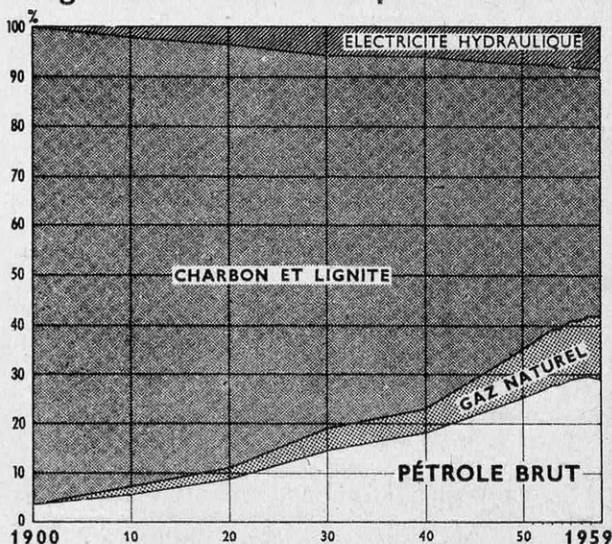
En Métropole, la S.N.P.A. a découvert, en 1949, un petit gisement pétrolier à Lacq. L'année 1951 vit les découvertes de Gallician en Camargue occidentale par la S.N.P.L.M. et surtout de Lacq profond, gisement de gaz dont l'éruption violente fut maîtrisée au bout de deux mois grâce à l'action rapide des spécialistes internationaux. Il fallut ensuite plusieurs années à l'industrie française pour résoudre les problèmes d'exploitation posés par la nature très corrodante du gaz (résistance des tubes de production), et par la grande profondeur du gisement (plus de 4 000 m). Tandis que se poursuivaient et se généralisaient les recherches en Métropole, la prospection débutait au Sahara par une campagne gravimétrique dans le nord-est. Déjà avaient été reconnus les petits champs de l'Oued Beth au Maroc, de l'Oued Guetérini, près d'Aumale, en Algérie, tous deux producteurs de pétrole, et du Cap Bon (gaz) en Tunisie.

La généralisation de l'effort: 1952-1957

Mais c'est essentiellement après 1952 que l'exploration a été organisée sur une grande échelle au Sahara, après l'octroi des premiers permis à la Société Nationale de Recherches et d'Exploitation de Pétrole en Algérie (S.N. REPAL) et à la C.F.P. (A), filiale pour l'Algérie de la Compagnie Française des Pétroles. Dès le début de leurs travaux ces deux sociétés s'associèrent sur la base d'un partage par moitié des dépenses et des profits. La Compagnie de Recherches et d'Exploitation de Pétrole au Sahara (C.R.E.P.S.), filiale de la Régie Autonome des Pétroles, et la Compagnie des Pétroles d'Algérie (C.P.A.), filiale du groupe Royal Dutch-Shell, se virent attribuer, en 1953, des permis, au sud d'El Goléa et près de la frontière libyenne. Les forages commencèrent et, dès 1954, une importante accumulation de gaz fut mise en évidence au Djebel Berga, au sud-ouest d'In-Salah. Son éloignement de la côte ne permet pas d'envisager l'exploitation actuellement, ni celle des deux autres gisements de gaz découverts dans le même secteur (permis occidental de la C.R.E.P.S.).

Cependant, deux ans plus tard, les découvertes successives d'Edjeleh et de Tiguentourine (en janvier et juin 1956) révélaient, à proximité de la frontière libyenne, l'existence d'une véritable province pétrolière, confirmée par la mise en évidence ultérieurement de Zarzaitine et d'El Abed Lacache, en 1958. L'année 1956 fut celle des grandes décou-

Évolution de la répartition de l'énergie entre les sources primaires



vertes, puisque ce fut aussi celle de Hassi Messaoud au sud-est de Ouargla, en juillet, gisement de pétrole d'importance mondiale, et de Hassi R'Mel, gisement de gaz humide qui est le deuxième du monde, en raison de ses réserves énormes. Il est remarquable que ces gisements aient été reconnus dans des délais records, malgré les difficultés de toutes sortes qui ont gêné considérablement le travail des prospecteurs.

L'activité intensive de recherche au Sahara, et l'importance des découvertes qui y étaient faites ne doivent pas faire oublier les résultats obtenus à la même époque à la fois en Métropole, où les efforts continuaient à se multiplier, et en Afrique équatoriale où des sondages positifs prouvaient la rentabilité de l'effort poursuivi. C'est, en effet, en mars 1954 que fut découvert le premier gisement important de pétrole en Métropole : Parentis, malgré les difficultés présentées par la réalisation de forages lacustres. La mise en production en était effectuée très vite, en même temps que se poursuivait la reconnaissance de l'étendue du gisement par des sondages d'extension. Dans la même région, à 10 kilomètres de Parentis, on découvrit le petit champ de Mothes un an plus tard. Des gisements d'importance très moyenne étaient mis en évidence en Alsace : Staffelfelden, Donau, Schwirheim, Reningue, Soufflenheim... L'année 1955 vit notre production nationale dépasser un million de tonnes. Au Gabon, pendant ce temps, étaient découverts les champs d'Ozouri et de Pointe Clairette (1956), très rapidement mis en exploitation, de M'Béga, d'Animba (1957) et, au Moyen Congo, de Pointe Indienne (1958). Le potentiel productif s'accroissait donc, au moment même où les promesses sahariennes se faisaient jour.

Débuts de mise en exploitation: 1957-1960

Sous l'influence des résultats obtenus très rapidement et, pour certains, de façon très spectaculaire, de nombreuses sociétés, dès 1957, se sont vivement intéressées aux perspectives offertes par cette activité nouvelle de la recherche du pétrole. Ceci était, par ailleurs, facilité par la venue à échéance de nombreux permis dont la durée est limitée par le droit minier français à un maximum de cinq ans.

Cette troisième période dans l'histoire pétrolière française est caractérisée principalement par la reconnaissance, le développement et la mise en œuvre des moyens d'exploitation des gisements découverts, en même temps que par une intensification de l'exploration.



Sur le lac de Parentis, le premier gisement impo

Les problèmes de « tubing » pour équiper les puits de Lacq ont été résolus vers le début de 1957 et l'exploitation a pu commencer à un rythme réduit vers le mois d'avril. Mais la réalisation des tranches ultérieures du programme a porté ce rythme à 3 millions de m³/jour en août 1958, à 5 millions de m³/jour en mars 1959 et à 10 millions de m³/jour à la fin de l'année 1959, à mesure qu'étaient mises en service les différentes unités de l'usine de traitement, où est effectuée la séparation des composants acides des hydrocarbures condensables contenus dans le gaz par la désulfuration et le dégazolinage.

D'autre part, une raffinerie fut construite à Ambès, destinée à traiter le pétrole brut de Parentis et, en avril 1958, était mis en fonctionnement un pipe-line de 98 km qui reliait le gisement à l'usine.

Au Sahara, la mise en valeur d'Hassi Messaoud commençait, de façon très restreinte; en 1957, le pétrole produit était ache-



0 rtant fut découvert en 1954. La mise en production fut rapide malgré la nature du terrain

miné vers Touggourt par le « baby-pipe », conduite de faible capacité (500 000 tonnes environ), puis vers Philippeville par chemin de fer. La mise en exploitation à un rythme correspondant à l'importance du gisement pouvait commencer en octobre 1959, lorsque fut terminé le pipe-line Hassi Messaoud-Bougie; en septembre 1960 fut mis en fonctionnement le pipe-line In Amenas-La Skirra, dont la réalisation avait été commencée à peine un an auparavant, permettant la production des gisements d'Edjeleh et de Zarzaitine. Les premiers champs découverts au Gabon étaient très rapidement équipés et, moins d'un an après le premier sondage productif de Pointe Clairette, le premier pétrolier chargé de brut quittait le Cap Lopez à destination de la Métropole.

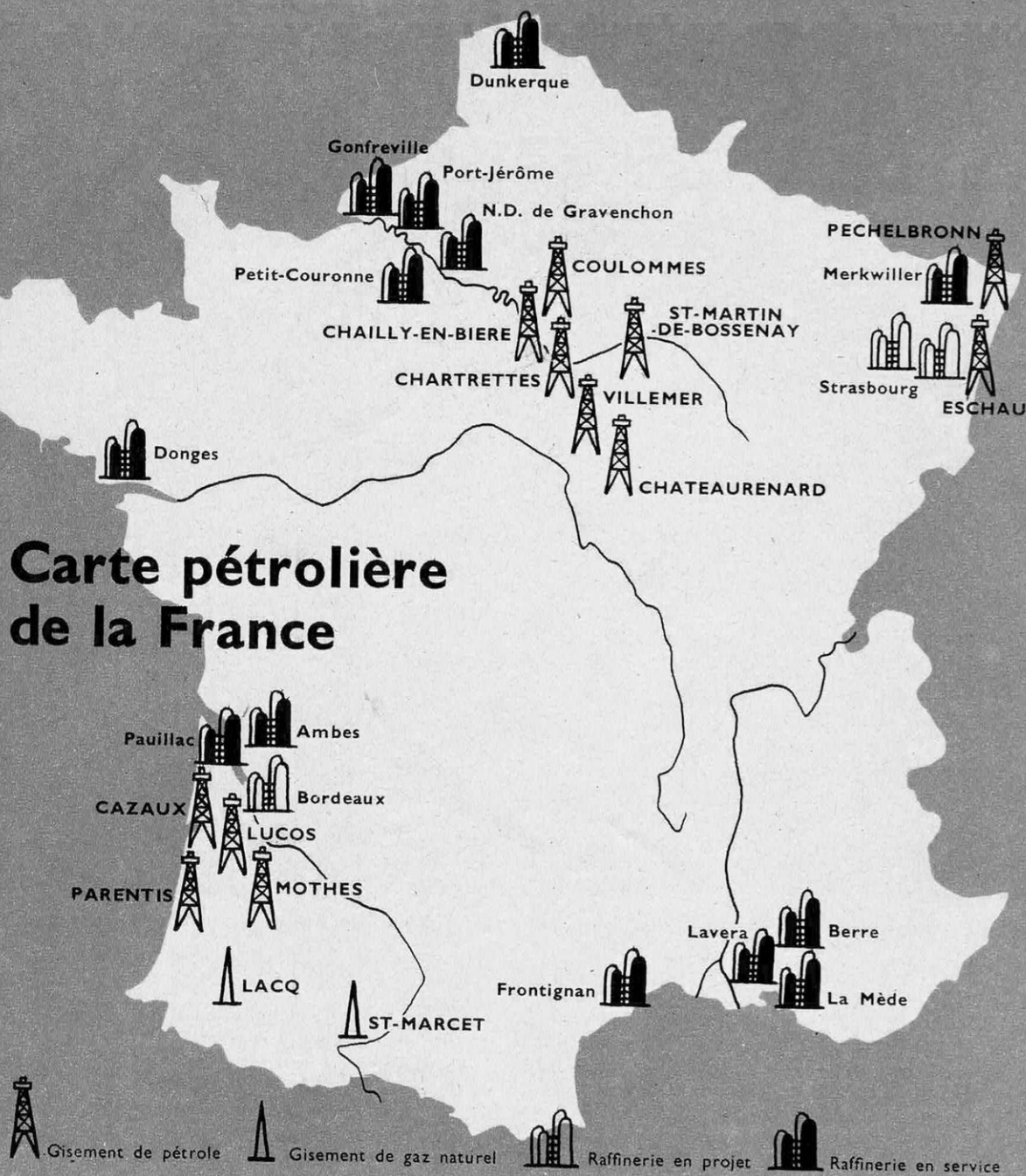
Cependant, les recherches continuaient, et si cette période récente ne vit pas de découverte comparable à celles de 1956 au Sahara, les gisements du Bassin Parisien : Coulomnes,

Châteaurenard, Chailly-en-Bière, Saint-Martin-de-Bossenay, Chartrettes, Villemer, ceux des Landes : Lugos et Cazaux, près de Parentis, ceux du Gabon : Cap Lopez, Tchengé et Alewana, et les indices sahariens particulièrement prometteurs : El Gassi et surtout El Agreb, El Adeb Larache, Ouan Taredert, Hassi Mazoula, Ouan Taredjeli, Ohanet apportaient la confirmation de la vocation pétrolière de la France.

La situation en 1960

Les résultats obtenus sont exceptionnels si l'on considère à la fois le peu de temps qu'il a fallu pour découvrir les gisements, la rapidité de la mise en exploitation et l'importance de la production. Ceci n'a pu être réalisé que grâce à l'utilisation de matériels et de techniques perfectionnés et grâce à l'apport financier d'origine presque exclusivement publique au départ, qui est venu de plus en plus

Carte pétrolière de la France



du secteur privé, encouragé par les premiers résultats. L'adaptation de la législation minière a pu jouer également un rôle favorable.

Cependant, les recherches continuent au même rythme car, si les ressources en pétrole sont suffisantes pour faire de la France un pays bientôt « self sufficient » dans cette source d'énergie et, dans quelques années, exportateur, il faut maintenir le potentiel productif à un niveau constant, sinon en élévation.

Une estimation du 31 décembre 1959 fait

ressortir, pour l'ensemble de la zone franc, des réserves récupérables de 621 millions de tonnes de pétrole brut et d'environ 1 000 milliards de m³ de gaz naturel. L'essentiel de ces réserves se trouve au Sahara, qui totalise 585 millions de tonnes dont 450 pour le seul gisement de Hassi Messaoud. Il s'agit ici naturellement des réserves prouvées, mais il est probable que la reconnaissance des gisements découverts très récemment : Ohanet, El Agreb, El Adeb Larache... permettra une

augmentation sensible de ce chiffre. La Métropole renferme dans son sous-sol des réserves prouvées récupérables de près de 27 millions de tonnes et le Gabon compte actuellement 8 millions de tonnes de réserves. Sur ces bases, il est évident que la production nationale de pétrole brut, qui a atteint 11,2 millions de tonnes en 1960, va continuer à s'accroître; dès 1961, elle fournira 18 à 20 millions de tonnes, soit plus de 55 % des besoins à cette date en pétrole brut, tandis que l'estimation provisoire de la production pour l'année 1962 atteint 26 millions de tonnes.

L'accroissement métropolitain est dû essentiellement à la mise en exploitation de nouveaux puits dans le Bassin Parisien, dont il est escompté, au total, 510 000 tonnes à partir de cette année, et dans la région des Landes (Gazaux), malgré l'épuisement progressif de Lacq supérieur et de certains gisements d'Alsace.

La production saharienne

L'essentiel de la production viendra cependant des régions sahariennes où l'équipement des gisements et l'installation des moyens de transport sont déjà bien avancés. En effet, la conduite de 660 km qui relie Haoud El Hamra, centre de collecte d'Hassi Messaoud, à Bougie, promu port pétrolier, transporte du pétrole brut depuis bientôt un an et demi. Dans un premier stade, sa capacité était de 4 650 000 tonnes/an, ce qui correspond à un débit journalier de 16 000 tonnes; puis, en avril 1960, celle-ci a été portée à 9 300 000 tonnes/an. Son débit définitif, prévu pour être acquis au mois de juillet 1961, sera de 14 millions de tonnes/an, par l'adjonction d'une troisième station intermédiaire de pompage. Sa réalisation avait demandé à peine plus d'un an, malgré les difficultés rencontrées sur le parcours.

Toute récente est la réalisation du pipe-line In Amenas-La Skirra dont les travaux ont commencé en septembre 1959 et ont été terminés fin août 1960. Cette conduite, longue de 775 kilomètres, achemine jusqu'à la côte tunisienne les productions d'Edjeleh et de Zarzaitine qui pourront être respectivement de 1,8 et 6,5 millions de tonnes. La mise en fonctionnement en a été effectuée avec une capacité initiale de 7,5 millions de tonnes qui sera portée, en plusieurs temps, à 17 millions de tonnes, le nombre de stations de pompage passant de 1 à 4.

La découverte d'Ohanet a remis à l'ordre du jour le projet de l'interconnexion entre les gisements de l'Est et Hassi Messaoud, et il a été décidé que l'évacuation de la production

de ce champ se fera par une conduite de grand diamètre le reliant au centre de collecte d'Haoud El Hamra, à partir duquel il pourra utiliser la capacité excédentaire du pipe-line vers Bougie. L'écoulement, compte tenu du relief du tracé, se fera par simple gravité.

Au Gabon, les gisements, proches de la côte, ne posaient pas pour leur production de problèmes importants d'acheminement, mais il a fallu construire, sur une côte peu favorable, des installations pour le chargement des pétroliers à Cap Lopez.

Le gaz naturel

Une augmentation notable est attendue également dans la production de gaz naturel : 2 787 millions de m³ de gaz commercialisable ont été fournis en 1960 et il est prévu une production de près de 4 milliards de m³ pour cette année dont la majeure partie proviendra de Lacq (88 %) encore. Cependant, le gaz d'Hassi R'Mel compte dès à présent pour une faible part dans cette estimation. En effet, la conduite qui doit relier le gisement d'Hassi R'Mel à Arzew, sur la côte algérienne, d'où il sera distribué dans toute la région d'Oran et d'Alger et utilisé comme source d'énergie et matière première pour un grand centre pétrochimique algérien, sera achevée vers le milieu de l'année. Ceci n'est d'ailleurs qu'une solution d'attente et les quelques centaines de milliards de m³ de gaz naturel brut (500 milliards de m³ en 1962, 900 milliards de m³ en 1963) qui seront produits les prochaines années ne sont guère comparables avec la productivité pouvant être escomptée eu égard aux réserves énormes : 800 milliards de m³. Une production annuelle de 20 à 25 milliards de m³ peut être envisagée pour le moment où le problème du transport vers la France et l'Europe sera résolu. Dans un premier stade, des bateaux méthaniers, à capacité restreinte, seront utilisés, tandis que, par la suite, l'acheminement se fera par canalisations sous la Méditerranée.

Ces résultats et les perspectives qu'ils ouvrent à l'économie française ont été acquis grâce à la mise en œuvre de moyens techniques, financiers et humains, dont le niveau actuel est un signe du dynamisme de notre industrie pétrolière nationale.

Pétrole et gaz dans l'économie française

Grâce à ces deux sources d'énergie, notre pays se trouve donc à un tournant de son économie énergétique : de pays exclusivement importateur de pétrole il s'oriente vers

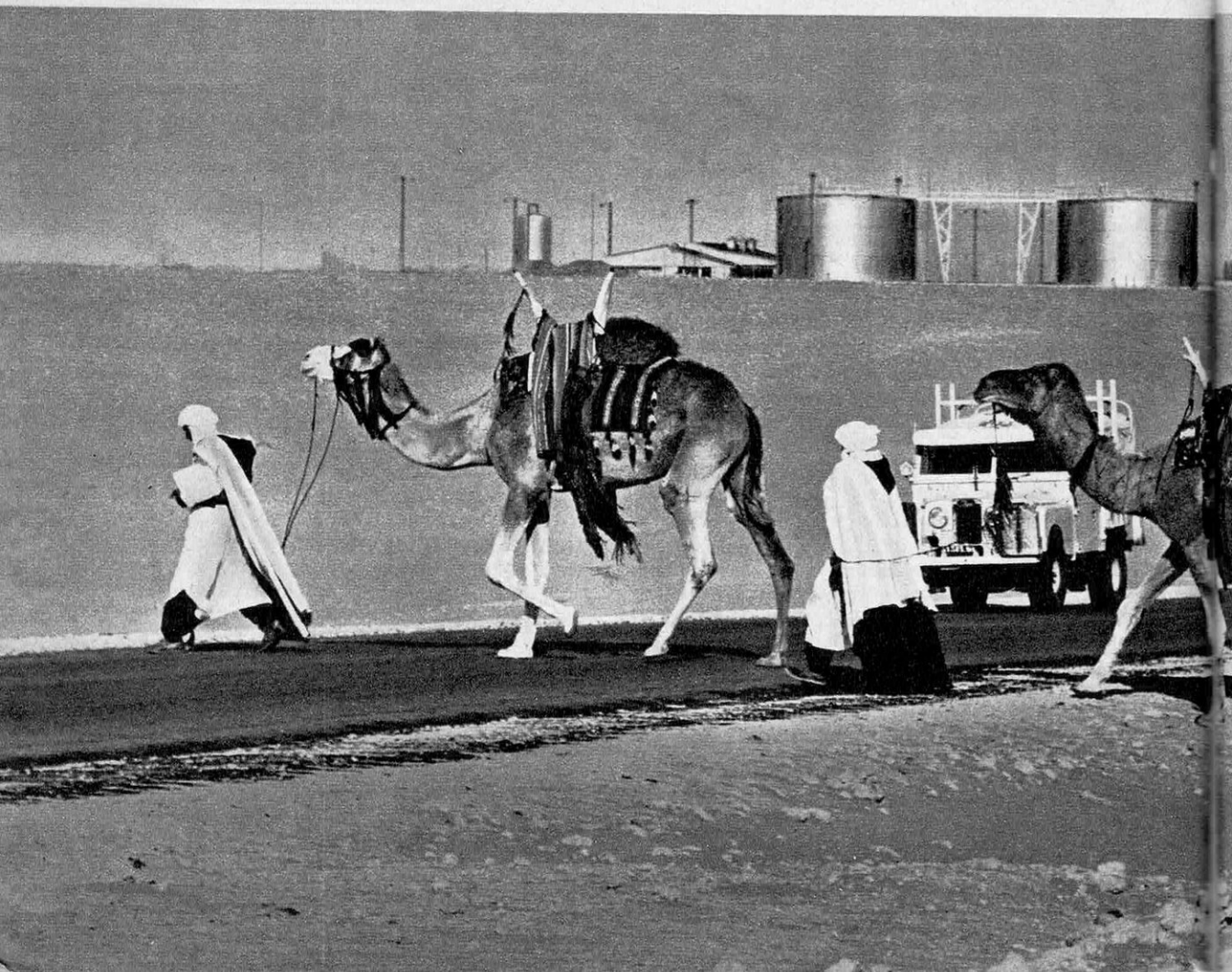
la suffisance dans ce domaine et pourra prochainement devenir exportateur, malgré l'accroissement prévu en valeur absolue et en valeur relative, c'est-à-dire par rapport à l'ensemble de la consommation énergétique, de la demande d'hydrocarbures en France. Le gaz naturel entre pour une part notable dans cette augmentation relative, car il tend à remplacer pour certaines utilisations une source primaire d'énergie plus traditionnelle : le charbon.

Le charbon est demeuré et doit demeurer encore pendant plusieurs années la principale source d'énergie en France; cependant sa part dans la consommation globale diminue progressivement. Le tableau ci-contre retrace l'évolution en pourcentage de la consommation d'énergie en France, par source, et donne les prévisions pour 1965.

Cette tendance est due essentiellement à la meilleure utilisation de chaque source d'énergie, mais aussi au moindre coût de revient et à la plus grande facilité d'emploi des produits pétroliers. Il est remarquable également que

Années	Pétrole	Gaz naturel	Électr. hydraul.	Énergie nucléaire	Charbon
1929	5,2		2,7		92,1
1938	12,5		4,9		82,6
1952	19,2	0,4	8,9		71,5
1955	24,8	0,4	9,6		65,2
1959	28,4	1,6	11		59
1965	30,4	3,7	11,2	2	52,7

la mise à la disposition de l'économie française du gaz de Lacq permet de renoncer à l'utilisation des gaz de houille, dont la production est certes moins rentable, dans des régions de plus en plus nombreuses. Le réseau de distribution en effet est pratiquement terminé. Après avoir atteint Angoulême, puis Nantes, à la fin de l'année 1958, il a gagné Paris et Lyon et fournit du gaz naturel à tout le Sud-ouest (avec Saint-Marcet) et à presque tout le Centre de la France. Un embranchement atteint même Besançon.



Le pétrole Saharien



En 1957 un « baby pipe » acheminait le pétrole d'Hassi Messaoud sur Touggourt et ce n'est qu'en octobre 1960 que fut terminé le pipe-line qui relie Haoud El Hamra, centre de collecte d'Hassi Messaoud, à Bougie. La capacité initiale de 4 650 000 tonnes/an vient d'être portée à 14 millions de tonnes/an depuis juillet dernier. Le pipe-line In Amenas - La Skhirra, qui dessert le gisement d'Edjeleh, est beaucoup plus récent; il ne fut mis en fonctionnement qu'en septembre dernier. Quant à la conduite qui doit relier Hassi R'Mel à Arzew, elle devrait être achevée ces mois-ci. A côté de la carte générale des pipes-lines sahariens existants et en projet, nous avons donné la photo d'un parc de stockage d'Hassi Messaoud.

Si l'on considère le bilan énergétique de la France, donné ci-dessous en équivalent charbon, on voit que la part du gaz naturel, dont la production, longtemps stationnaire puisqu'elle était assurée par le seul gisement de Saint-Marcet, a plus que doublé de 1958 à 1959. La même progression a été acquise pour 1960 et peut être attendue en 1961. La consommation de pétrole est aussi en progrès constants depuis dix ans.

**Consommation totale réelle
d'énergie primaire**
(en milliers de tonnes d'équivalent charbon)

Années	Charbon	Produits pétrol.	Gaz	Électr.	Total
1949	70 248	13 455	346	4 740	88 789
1950	65 061	15 534	351	6 575	87 521
1951	71 782	18 597	399	8 477	99 255
1952	69 412	20 313	369	8 959	99 053
1953	66 828	22 234	379	8 438	97 879
1954	67 388	24 792	419	9 626	102 225
1955	70 584	27 076	505	10 172	108 337
1956	75 001	29 832	599	10 399	115 831
1957	81 418	30 256	927	10 012	122 613
1958	72 966	33 892	1 191	13 070	121 119
1959	71 939	35 655	2 349	13 048	122 991

Cette évolution, qui est normale et que l'on retrouve, plus ou moins avancée, dans les autres pays, se double d'une modification structurale des approvisionnements : provenant presque exclusivement des importations, surtout du Moyen-Orient, voici à peine dix ans, il sont de plus en plus largement assurés par la production nationale.

Vers l'autonomie pétrolière

Le cap des dix millions de tonnes de production nationale annuelle a été franchi en 1960. Si l'on compare ce résultat aux besoins, on constate que la part des importations dans la couverture des besoins français est encore largement majoritaire. Ce n'est qu'à partir de 1961 que le pétrole français couvrira environ la moitié de nos besoins en pétrole brut, situation qui s'améliorera encore au cours des années suivantes.

Cependant, même si la production nationale de pétrole devenait globalement excédentaire, un certain pourcentage d'importation devrait être maintenu. L'indispensable adaptation des produits pétroliers aux besoins de l'économie conduira nécessairement à des échanges entre bruts riches en produits lourds et bruts riches

en produits légers. En même temps qu'elle constitue un facteur de prospérité pour tous ses participants, la structure internationale du marché pétrolier facilitera de telles opérations. Dans le passé, la coopération internationale et la solidarité dont ont fait preuve les grandes sociétés internationales — notamment au moment de la crise de Suez — ont permis à notre pays et à l'Europe de franchir un cap difficile. Cette même coopération sera également indispensable dans l'avenir, soit pour faciliter ces échanges, soit pour assurer le placement de surplus éventuels de production nationale.

L'importance accrue du pétrole français dans les approvisionnements de la zone franc va permettre une économie de devises considérable. Mais ce résultat n'est pas le seul à considérer.

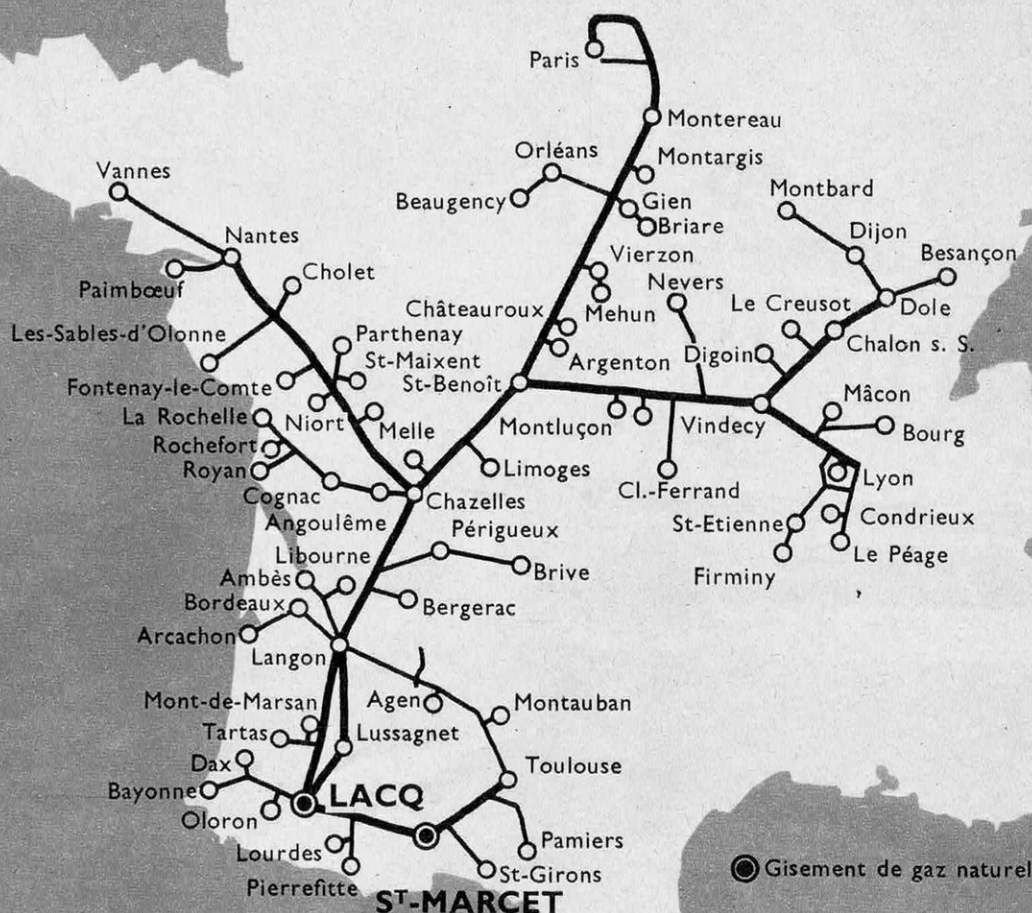
Des activités nouvelles pour l'industrie française

Le développement de ces activités nouvelles a suscité l'adaptation des fabrications françaises en vue de remplacer les importations coûteuses de matériel étranger. La fabrication d'aciers spéciaux pour les tubings de Lacq est une réussite de l'industrie métallurgique française. Les entreprises qui ont apporté leur concours aux différentes installations et réalisations sont multiples et intéressent les domaines les plus divers. Ont participé et participent à la fourniture de matériel des entreprises de constructions métalliques, électriques et mécaniques, des fabricants de tubes, de moteurs de pompes, de vannes, de matériels de télécommunications, de véhicules; ont fourni leurs services des sociétés d'études et de contrôle, des entreprises de travaux publics; au total, c'est une large partie de l'industrie française qui a profité d'un accroissement d'activité.

Dans un autre domaine, il a fallu adapter et innover : les conditions géographiques et climatiques ne permettaient pas de construire au Sahara. Des logements préfabriqués y ont été installés, avec le plus de confort qu'il était possible, pour le personnel. Il convient de souligner également que, grâce au pétrole, un remarquable réseau routier joint les centres importants du désert et que la circulation aérienne est devenue chose courante.

Pour revenir aux efforts métropolitains, et c'est vers Lacq que l'on se tourne à nouveau, on doit noter que, grâce à l'exploitation du gaz naturel de ce gisement et du sous-produit qui en résulte, notre pays est en cours de devenir un des premiers pays producteurs de soufre du monde avec une production annuelle de 1 400 000 tonnes par an, lorsque le rythme

Le réseau de transport du gaz naturel français



me définitif d'exploitation sera atteint, et est d'ores et déjà exportateur de soufre. Pour cela, le port de Bayonne a été équipé et permet le chargement des bateaux très rapidement et le stockage d'environ 30 000 tonnes. Le transport du soufre en vrac entre Lacq et Bayonne est effectué par wagons-trémie en alliage léger, construits spécialement à cet effet. On est ici encore en présence d'une réalisation sinon exceptionnelle, du moins remarquable à la fois par les techniques qui ont été déployées et par la possibilité qu'elle offre de mettre en valeur un port de second ordre dont l'activité restait faible.

Réalisations de grande envergure à l'échelle de la nation, tel est le bilan d'une activité récente mais parvenue rapidement à maturité et particulièrement dynamique. Ce même dynamisme l'entraîne à présent à mettre l'expérien-

ce acquise durant quinze ans à la disposition de pays qui débutent dans la recherche pétrolière. C'est ainsi que plusieurs sociétés françaises, déjà productrices, ont obtenu des permis de recherches d'hydrocarbures, l'une en Espagne, l'autre en Grèce, qu'une autre société, filiale d'un groupe français, fait des recherches en Libye, et que des sociétés de forage travaillent dans des pays voisins, en Suisse notamment.

Le raffinage

Le raffinage valorise le produit brut par sa transformation en un grand nombre de dérivés destinés, soit à être immédiatement consommés, soit au contraire à être utilisés comme matière première par certaines industries de transformation.



Le pétrole subit tout d'abord, sur le gisement même, un certain nombre de traitements de première épuration sommaire. Débarrassé de ses éléments les plus légers et de certaines impuretés, il est ensuite livré aux raffineries.

Les rendements des bruts en produits finis sont variables suivant leur origine. Il est donc nécessaire que la marche des raffineries soit suffisamment souple pour adapter ces divers pétroles à leur plan de fabrication, car les produits obtenus doivent correspondre aux besoins des consommateurs. En un mot, l'industrie du raffinage doit être en mesure de répondre quantitativement et qualitativement à la demande, en traitant une matière première non uniforme quant à sa composition.

L'implantation des raffineries

Dans l'ensemble du monde, les capacités nouvelles de raffinage en construction ou en projet représentent 110% de la consommation globale des produits pétroliers. La capacité excédentaire est d'ailleurs variable suivant les pays; aux États-Unis elle excède d'environ 20% les besoins, en France 30%, aux Pays-Bas 70%.

Le développement le plus remarquable enregistré ces dernières années s'est produit en Europe occidentale où la capacité de raffinage a presque décuplé en dix ans. C'est l'intérêt que représente le raffinage du brut sur le territoire du pays consommateur, notamment du point de vue de l'économie en devises, qui en est la principale cause.

La tendance manifestée au début du siècle, consistant à construire des raffineries sur les lieux mêmes de la production (Abadan) a donc été renversée, sauf pour certains pays comme le Vénézuéla où l'octroi de concessions est conditionné par l'obligation de raffiner sur place au moins 15% de la production.

En France, l'absence d'une industrie nationale s'est cruellement fait sentir pendant la première guerre mondiale et des efforts furent entrepris dès la fin des hostilités pour favoriser l'implantation de cette activité. Le résultat ne fut atteint cependant qu'après le vote de la loi de 1928 qui devait constituer la charte de l'industrie pétrolière française, en lui donnant notamment les garanties de stabi-

lité nécessaires à son développement. Dès 1933, et pour la première fois depuis le début du siècle, l'importation de pétrole brut destiné à être traité dans des raffineries françaises l'emportait à nouveau sur celle des produits finis.

L'activité des raffineries françaises

À la libération du territoire, en 1944, la capacité de raffinage était tombée par suite des destructions de la guerre, de 8 millions de tonnes en 1938, à 1,5 million de tonnes. Le relèvement devait s'effectuer à un rythme exceptionnellement rapide. Bousculant les prévisions — cependant audacieuses — du Plan Monnet, la capacité française de raffinage atteignait à nouveau 8 millions de tonnes en 1948, 14 millions en 1950, 30 millions en 1956. Elle dépasse aujourd'hui 40 millions de tonnes et de nouveaux progrès sont en cours de réalisation. Les raffineries françaises sont ainsi passées en quinze ans de l'anéantissement presque complet à la première place en Europe continentale, devant les industries italienne, allemande, néerlandaise et belge.

Les raffineries françaises ont traité 32,6 millions de tonnes de pétrole brut en 1960, contre 30,8 millions en 1959. Le pétrole d'origine nationale traité dans nos raffineries a représenté 9,3 millions de tonnes (28,5% des quantités totales traitées) contre 3 (moins de 9,8%) l'année précédente.

Les importations de pétrole brut d'origine étrangère ont en conséquence reculé très sensiblement d'une année à l'autre (23,4 millions de tonnes contre 27,6), allégeant d'autant notre balance des paiements en devises. Le Moyen-Orient n'a fourni en 1960 que 63% de nos approvisionnements totaux contre 81% en 1959 et 90% en 1955.

La capacité annuelle de traitement des raffineries, qui était de 37,4 millions de tonnes au 1^{er} janvier 1960, a été portée à 40,4 dans le courant de l'année.

Amélioration des qualités

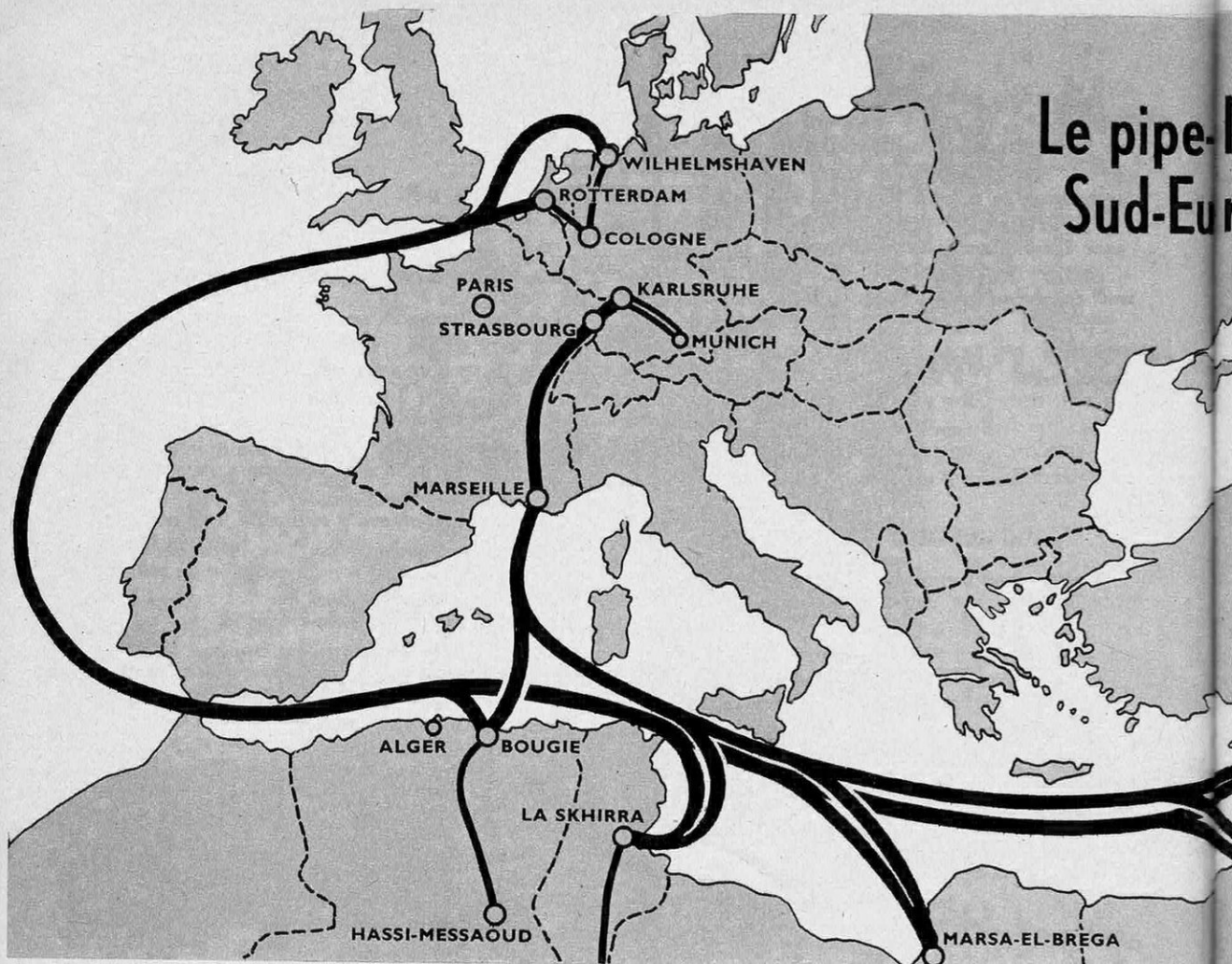
Le développement des capacités de traitement s'est accompagné d'un effort comparable pour accroître la qualité des produits fournis. C'est ainsi que l'essence et le supercarburant ont fait l'objet en 1960 de nouvelles améliorations de qualité. Au 1^{er} mai, l'indice d'octane minimum au départ des raffineries a été fixé à 86 pour l'essence et à 94 pour le supercarburant (contre respectivement 74 et 79 il y a dix ans). Une nouvelle progression de deux points était prévue pour le 1^{er} mai 1961.

Un effort particulier a également été entre-

← Raffinage en Basse-Seine

Actuellement 3 600 000 tonnes de pétrole brut (et bientôt le double) sont traitées dans la raffinerie construite près du Havre, sur les marées de la Basse-Seine, par la Compagnie Française de Raffinage. Comme dans les autres raffineries de la Basse-Seine on y traite le « brut » du Moyen-Orient ou du Sahara.

Le pipe- Sud-Eur



pris pour réduire encore la teneur en soufre des produits noirs. Le pourcentage a été abaissé au 1^{er} mai de 2,70 à 2,50% pour le fuel léger, de 1,6 à 1% pour le fuel domestique, de 1 à 0,8% pour le gas-oil moteur. De nouvelles améliorations sont dès maintenant prévues pour le 1^{er} mai 1961. La teneur en soufre du fuel léger tombera à 2% et celle du fuel domestique à 0,8%.

Le transport par pipe-line

Il existe aujourd'hui, dans le monde, quelque 365 000 km de conduites transportant des produits pétroliers, dont 285 000 km pour le pétrole brut et 75 000 km pour les produits finis. D'autre part, 970 000 km environ de tubes relient les sources de gaz naturel aux centres consommateurs.

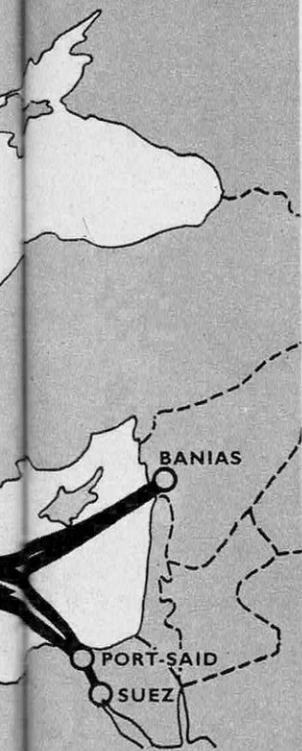
C'est dire que la pose d'un pipe-line, en particulier celle d'un pipe-line de pétrole brut, n'est plus une entreprise exceptionnelle. Ce caractère « d'opération courante » s'applique

en premier lieu aux réalisations américaines, mais il est valable également en Europe et au Sahara où, de 1953 à 1960, divers pipes-lines ont été mis en service, un de produits finis de 240 km entre Le Havre et Paris en 1953, et cinq conduites de pétrole brut :

- en 1958, Parentis — Ambès, 98 km;
- en 1959, Wilhelmshaven — Cologne, 385 km;
- en 1960, Rotterdam — Rhin, 300 km;
- Hassi-Messaoud — Bougie, 660 km; Edjeleh — La Skhirra, 775 km.

La construction d'une conduite destinée au transport des hydrocarbures liquides entre le littoral méditerranéen et les complexes pétroliers qui vont se développer notamment dans le Nord-Est de la France et en Allemagne du Sud appartient au domaine des projets longuement débattus. Une technique désormais classique ne la signifierait pas spécialement à l'attention nationale et internationale si son importance et les conditions particulières de son exploitation, à la fois en France et en

e-line européen



De caractère international par le nombre et la nationalité de ses sociétés fondatrices qui appartiennent à 6 pays différents, le pipeline Sud-Européen l'est également par ses dimensions. Long de 760 km, il aura un débit initial de 10 millions de tonnes par an qui pourra être porté progressivement à 25 millions. — Partant de Marseille-Lavéra, il assurera le ravitaillement en pétrole brut des raffineries en cours de construction en Alsace et à Karlsruhe. Les travaux viennent d'être entrepris, ils s'échelonnent sur deux ans. Les dépenses d'investissement initial sont évaluées à 600 millions de nouveaux francs. Ce pipeline sera, par l'importance de son débit l'un des plus grands pipes-lines mondiaux et raccourcira de plus de 3 000 km la route traditionnelle du pétrole via Gibraltar et la Mer du Nord. Il constituera d'autre part un facteur direct d'expansion de notre économie nationale, tant par l'importance que prendra le complexe de Marseille-Lavéra que par le développement de complexes pétrochimiques en Alsace et dans les pays limitrophes.

Allemagne, ne lui conféraient une originalité propre.

L'industrie du raffinage du pétrole en Europe a été longtemps localisée à proximité des ports d'importation, notamment sur le pourtour de l'Étang de Berre, sur la Basse-Seine, à Anvers, à Rotterdam et à Hambourg. Cette situation portait préjudice aux régions éloignées du littoral, les produits finis étant grevés de frais de transport d'autant plus lourds que le lieu de leur consommation s'éloignait des côtes.

A partir du moment où les progrès techniques des pipes-lines ont rendu possible le transport de tonnages importants de produits pétroliers, deux solutions s'offraient pour réduire les frais de transport des produits finis :

— ou bien le recours à un pipe-line de produits finis reliant des raffineries littorales aux centres de grosse consommation de l'intérieur,

— ou bien le recours à un pipe-line ravi-

taillant en pétrole brut des raffineries situées à proximité des centres de consommation de l'intérieur.

Or, le transport par pipe-line de produits finis n'est pas toujours possible en raison de la diversité des produits demandés par de nombreux consommateurs disséminés sur des régions plus ou moins étendues et, surtout, parce que le transport des fuels lourds très visqueux s'avère techniquement assez difficile.

Les sociétés pétrolières ont donc envisagé l'implantation de nouvelles raffineries au cœur même des zones industrielles de l'intérieur et, partant, à donner la préférence au pipe-line de pétrole brut. Cette orientation s'est déjà traduite par le développement d'un centre de raffinage dans la région Ruhr/Cologne dont les raffineries ont été reliées par pipeline à la Mer du Nord.

Elle se traduira, au cours des cinq prochaines années, par la création de deux autres centres : l'un dans la région du Rhin supérieur où seront construites quatre raffineries, deux à Strasbourg et deux à Karlsruhe, l'autre, dans la région de Munich.

De nouveaux centres de raffinage sur le Rhin et en Bavière

Le *pipe-line sud-européen* assurera le ravitaillement du centre de raffinage du Rhin à partir du port pétrolier de Lavéra, l'approvisionnement en pétrole brut du centre de Bavière étant envisagé à l'aide d'un autre pipeline à partir de Karlsruhe. Le débit annuel de la conduite sera de 10 millions de tonnes, ce qui la classera, dès sa mise en service, au rang des plus grands pipe-lines mondiaux. Ce débit sera porté ultérieurement et progressivement à plus de 25 millions de tonnes. Le raccourcissement de parcours, par rapport à la route maritime qui mène du Moyen-Orient, de Libye ou d'Afrique du Nord à la Mer du Nord par Gibraltar, atteindra plus de 3 000 km.

Sur le plan national, grâce à l'ouvrage projeté, le complexe Marseille-Lavéra deviendra l'une des principales têtes de pont européennes de l'approvisionnement en pétrole brut. Le trafic de Lavéra était déjà de 17 millions de tonnes en 1959. Ses installations seront développées de façon à faire face au trafic nouveau et à permettre la réception des tankers de gros tonnage.

En outre, la naissance de la nouvelle économie pétrolière de Strasbourg entraînera pour l'Alsace et les régions limitrophes une expansion très sensible. Les travaux d'extension du bassin aux pétroles de notre port

Le port pétrolier de Lavéra →

Les installations de ce port, qui ont assuré un trafic de 17 millions de tonnes en 1959, vont permettre bientôt l'accostage des plus gros tankers. De la sorte le complexe Marseille-Lavéra, dont on aperçoit le parc des réservoirs de stockage, deviendra l'un des principaux points d'approvisionnement en « brut » de toute l'Europe occidentale.

rhénan correspondent d'ailleurs à l'orientation nouvelle de décentralisation.

Les essais de la ligne et la mise en service de l'ouvrage seront réalisés fin 1962 — début 1963. Cette date coïncidera avec le moment où les raffineries projetées dans la région du Rhin supérieur seront elles-mêmes prêtes à fonctionner.

Pour financer ce programme général de travaux, et selon les estimations présentes, les dépenses globales d'investissements initiaux sont évaluées à 600 millions de nouveaux francs.

Stockage et distribution

La nécessité de détenir en permanence des stocks importants de pétrole brut et de produits finis constitue pour l'industrie du pétrole une lourde charge financière. Cette nécessité résulte pour une part d'une obligation légale. Pour des raisons de sécurité et de défense nationale, la loi du 30 mars 1928 et plusieurs textes postérieurs imposent aux sociétés pétrolières de constituer des stocks importants dont la répartition sur le territoire doit être approuvée par les pouvoirs publics. Dernier en date de ces textes, le décret du 10 mars 1958 prévoit la détention permanente d'un stock égal à trois mois de mise à la consommation. En application de cette disposition réglementaire, les sociétés ont été conduites à édifier de nouveaux moyens de stockage.

La capacité totale de stockage de l'industrie française du pétrole atteint aujourd'hui 11,5 millions de m³ (dont 8 en raffinerie et 3,5 en distribution), contre 3,4 en 1938.

Contrairement à ce que l'on pense généralement, l'essence ne représente en France qu'une part relativement limitée (24 %) de la distribution, mais celle-ci doit assurer en tous lieux l'approvisionnement des consommateurs en autres produits : fuels industriels et domestique, lubrifiants.

Pour assurer le transport des produits finis entre les raffineries, les entrepôts de distribution et les points de vente ou de consommation, tout un parc important de



(Ph. aérienne R. Durандаud)

moyens de transport est nécessaire en dehors du pipe-line de produits finis Le Havre-Paris, qui, en 1960, a transporté 2,5 millions de m³ de produits.

Ce matériel, qui appartient soit aux sociétés pétrolières, soit à des transporteurs divers, n'a cessé d'être développé et modernisé : il comprend actuellement 708 chalands-citernes, 11 095 wagons-citernes, plus de 6 000 camions-citernes. La capacité unitaire de ces matériels de transport n'a cessé d'augmenter. Elle s'élève pour les



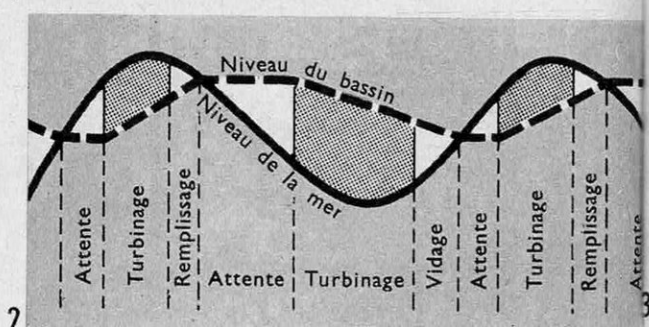
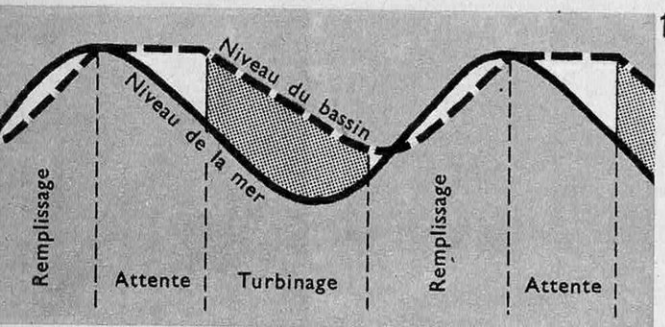
wagons-citernes à 30 m³; pour les transports routiers, on utilise des camions gros porteurs de plus de 25 000 litres.

Grâce à la mise en œuvre de ce programme de modernisation, le coût de la distribution, qui demeure encore lourd, a pu être sensiblement amélioré.

La réorganisation du réseau a permis notamment de réduire le nombre des points de vente par un meilleur choix de leur emplacement. Leur nombre a en effet diminué de 55 000 en 1958 à 40 000 en 1960. Le débit par

pompe a ainsi triplé entre ces deux mêmes dates.

Le développement de la circulation routière a conduit d'autre part à reporter dans toute la mesure du possible le stationnement des véhicules en cours de ravitaillement en dehors de la chaussée de façon à améliorer la sécurité de la voie publique. Les pistes de décélération et d'accélération que comportent les postes de distribution permettent aux automobiles de se séparer du trafic, puis d'y entrer sans apporter de perturbation.



Trois méthodes d'exploitation pour une usine marémotrice

Dans le turbinage direct à simple effet (1), le bassin se remplit à pleine mer par des vannes et se vide à travers les turbines quand la mer est suffisamment baissée. Dans le cycle à double effet (2), les groupes

usines

L'UTILISATION par l'homme de l'énergie de la marée est aussi ancienne que celle de l'énergie du vent ou des rivières, mais les moulins à marée ont presque entièrement disparu des côtes sans avoir été remplacés par des installations industrielles modernes.

En même temps que se développait la houille blanche, plusieurs projets d'usines marémotrices ont pourtant été étudiés en France et dans le monde, mais sans aboutir, et l'usine de la Rance, dont les travaux viennent d'être entrepris, est bien la première réalisation industrielle au monde pour l'utilisation de l'énergie de la marée.

Une des raisons est sans doute la rareté relative des sites favorables à l'installation d'une usine marémotrice. On peut montrer en effet assez aisément que le taux de rentabilité d'une telle installation croît rapidement avec l'amplitude de la marée et n'atteint une valeur comparable à celle d'une installation hydroélectrique classique que pour les plus fortes marées connues au monde.

Ces fortes marées sont concentrées dans des zones de dimensions assez réduites en dehors desquelles l'amplitude tombe très vite à des valeurs enlevant tout intérêt à son utilisation pour la production d'énergie. La France dispose d'un emplacement particulièrement favorable avec la baie de St-Malo, et notamment l'estuaire de la Rance.

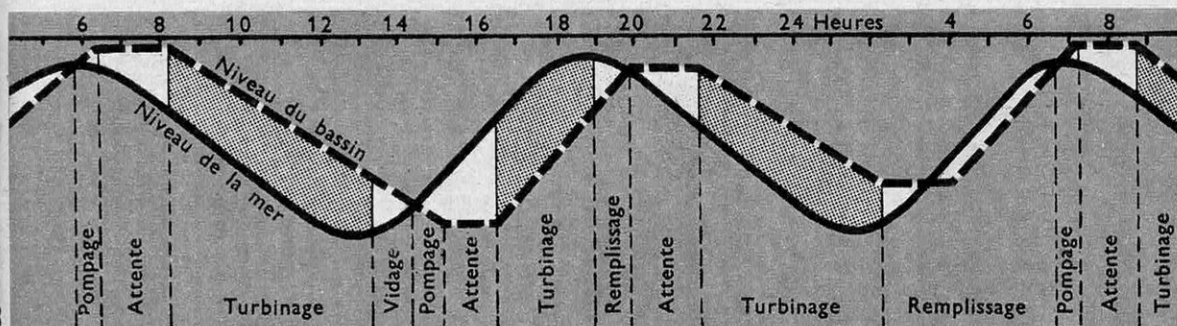
Là, la marée est semi-diurne, c'est-à-dire qu'elle présente deux maximum par jour, l'amplitude, c'est-à-dire la différence entre les cotes maximum et minimum, variant suivant les jours de 13,20 m à 6,60 m avec une périodicité de 15 jours environ. Les heures de pleines mers et basses mers varient aussi suivant la même périodicité.

Il est bon de rappeler aussi que l'heure comme l'amplitude des marées en un lieu est exactement prévisible aussi longtemps à l'avance qu'on peut le souhaiter, ce qui donne aux usines marémotrices un avantage essentiel sur les usines hydrauliques ordinaires dont la production est soumise à l'aléa des conditions atmosphériques.

Bassins associés ou bassin unique

L'idée la plus simple pour utiliser l'énergie est, comme dans les moulins à marée, de remplir un bassin à pleine mer par des vannes et de le vider à travers une turbine dès que la mer a suffisamment baissé.

Dans la terminologie actuelle, une telle usine est dite fonctionner uniquement en « turbinage direct simple effet »; elle ne produit de l'énergie que quelques heures par jour à des moments parfaitement fixés par la marée, variables d'un jour à l'autre et qui n'ont aucune raison d'être ceux où l'on a le plus grand besoin d'énergie.



hydroélectriques fonctionnent dans deux sens, tant pendant le remplissage du bassin que pendant son vidage. Le cycle à sesqui-effet (3), est plus complexe, les groupes pouvant fonctionner dans les deux sens,

non seulement en turbines mais en pompes, ce qui permet de compléter, lorsque cela est nécessaire, le remplissage du bassin au moment de la pleine mer et de parfaire son vidage au moment de la basse mer.

marémotrices

Un des buts principaux des recherches antérieures à la dernière guerre relatives à l'utilisation de l'énergie des marées a été d'obtenir une énergie régularisée en jouant sur la vidange et le remplissage de plusieurs bassins.

Citons parmi les types d'aménagement complexe le dispositif à bassins associés imaginé par Bélidor dès 1737 et repris ensuite par différents ingénieurs. Mais il existe des combinaisons beaucoup plus complexes par lesquelles on a envisagé de s'affranchir non seulement de l'irrégularité journalière, mais même de l'irrégularité saisonnière résultant de la succession des vives-eaux aux mortes-eaux.

La complexité de ces bassins et l'importance relative des digues dans le prix des aménagements conduisaient les ingénieurs à chercher des sites où la configuration de la côte créait des bassins naturels au lieu de

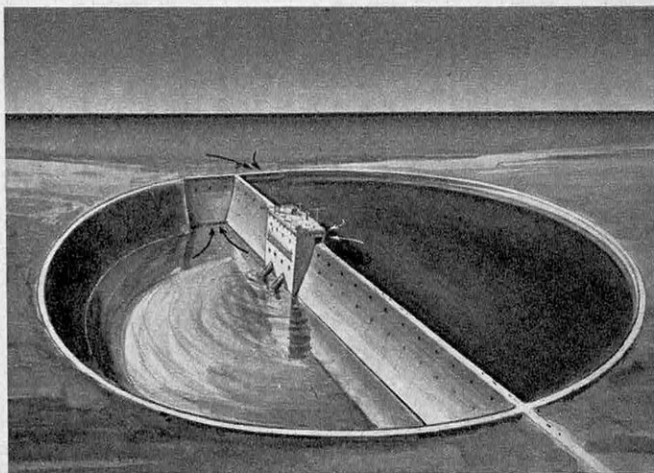
chercher les plus grandes amplitudes de marée.

Les recherches d'Électricité de France se sont très vite orientées dans une autre direction.

Tout d'abord, il est apparu que le prix des ouvrages à réaliser pour obtenir de l'énergie régularisée était très élevé. D'autre part, alimentant un réseau interconnecté, il n'était plus indispensable que la puissance produite soit constante, l'inconvénient de l'irrégularité de la production pouvant dans une certaine mesure être compensé par la possibilité

Les bassins conjugués de Bédior →

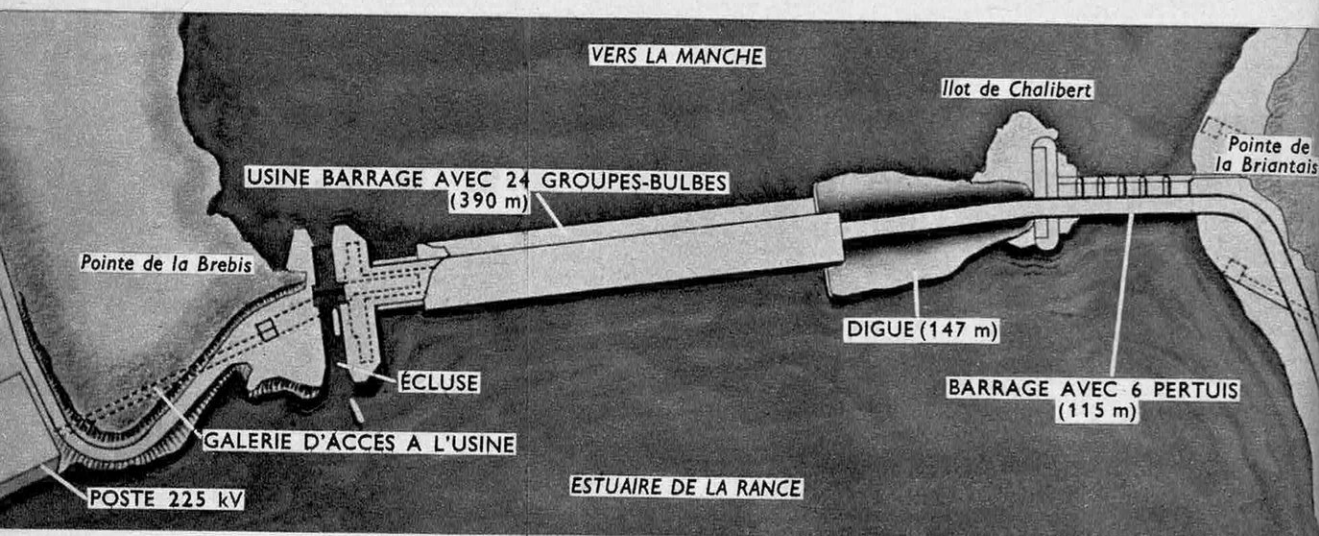
Cette disposition vise à s'affranchir de la sujétion des marées. Le bassin supérieur est maintenu à un niveau élevé par ouverture de ses vannes à pleine mer et le bassin inférieur est à un niveau bas par ouverture de ses vannes à basse mer. On obtient une puissance constante, mais le débit équipé doit être très faible par rapport à la capacité des bassins.



L'aménagement de l'estuaire de la Rance

ON voit ici la disposition des ouvrages qui barrent l'estuaire de la Rance entre la pointe de la Briantais et la pointe de la Brebis, distantes d'environ 750 m. Le volume de la retenue utile sera de 184 millions de mètres cubes utilisables et la production annuelle sera de 560 millions de kWh. La puissance totale installée sera de 240 000 kW, en 24 groupes bulbes de 10 000 kW. Chaque groupe réversible turbine-pompe est composé d'une coque métallique ou bulbe contenant l'alternateur et d'une roue à pales orientables. L'axe de l'ensemble est dans le sens du courant et la disposition est telle que le fonctionnement le plus fréquent correspond à l'écoulement dans le sens du bulbe vers la roue, le bassin se trouvant sur la gauche

des figures de la page ci-contre et la mer sur la droite. Le diamètre de la roue à 4 pales est de 5,35 m et elle tourne à 94 tours/minute. L'alternateur est accouplé directement à la turbine et tourne dans une atmosphère comprimée à 2 kg/cm². Grâce au profil en S des aubes, les différents fonctionnements peuvent être obtenus avec une course angulaire de seulement 45° alors que l'usage de pales classiques nécessiterait une course de 180°; les transitions sont ainsi beaucoup facilitées. En bas, écorché du groupe d'essai : 1, roue à pales orientables; 2, commande des pales; 3, distributeur mobile; 4, avant-distributeur; 5, arbre; 6, palier; 7, palier et butée double; 8, alternateur; 9, ogive réfrigérante; 10, ventilateur; 11, puits d'accès.



de prévoir longtemps à l'avance la puissance fournie à tous moments. La valeur économique de la production était toutefois considérablement accrue s'il était possible de la concentrer pendant les moments de la journée, où le réseau est le plus chargé.

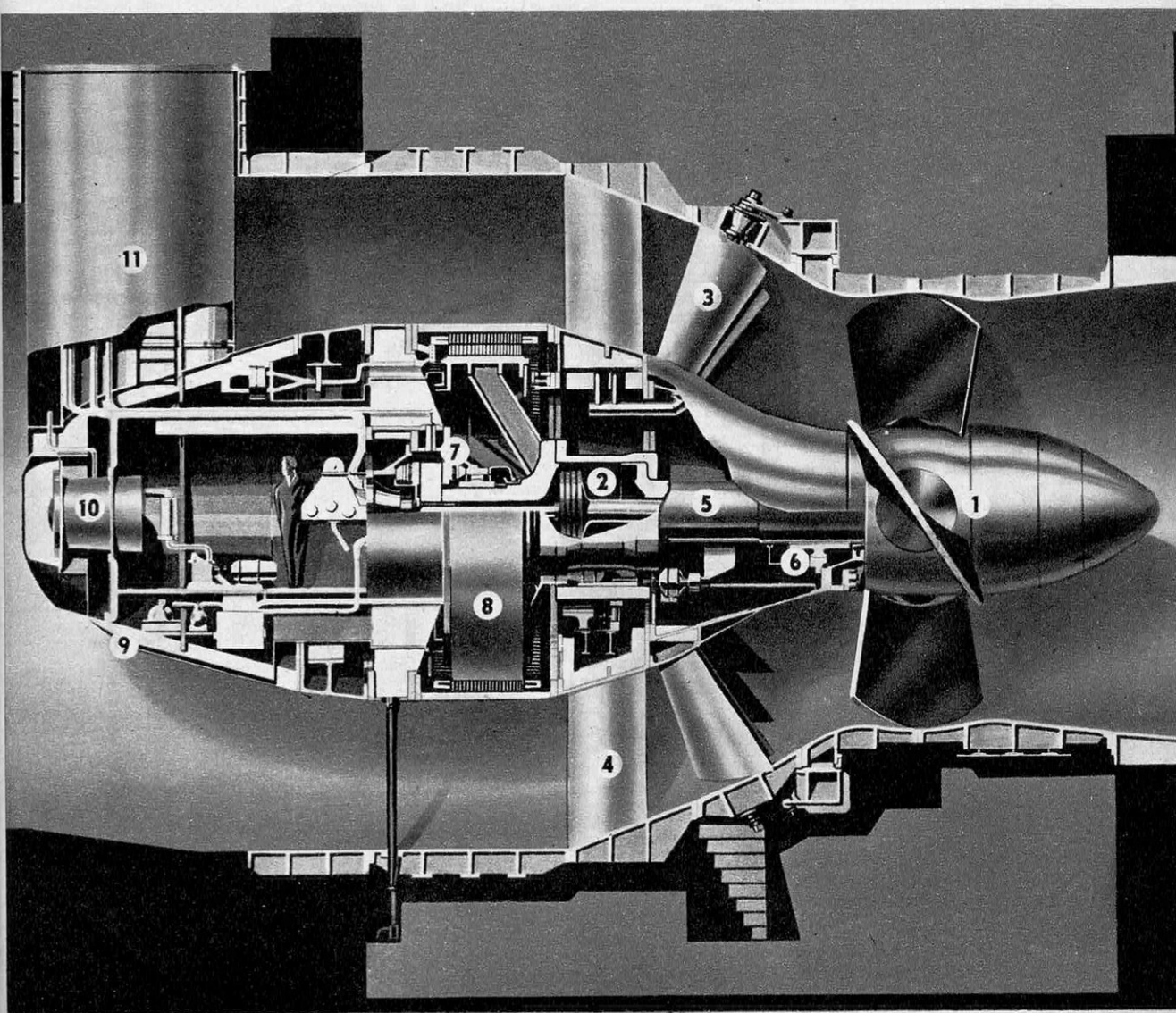
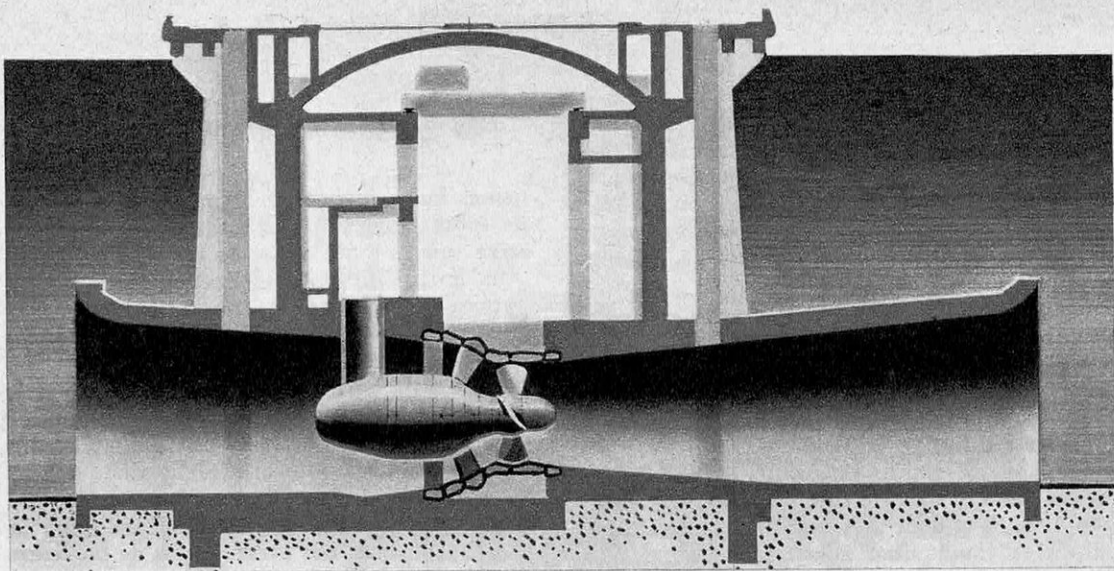
Or l'étude approfondie des modes d'exploitation d'une usine marémotrice a montré qu'il était possible d'obtenir ce dernier résultat avec un seul bassin, à condition de disposer de groupes hydroélectriques pouvant fonctionner en turbine ou en pompe dans l'un ou l'autre sens, avec un rendement satisfaisant sous des hauteurs de chute très variables.

Suivant l'heure de la marée, les turbines peuvent ainsi être entraînées soit par l'eau de vidange du bassin (turbinage direct) soit par l'eau de remplissage du bassin (turbinage inversé), en réalisant des cycles d'exploita-

tion tels que le double-effet ou le sesqui-effet décrits pages 128-129.

Quant au pompage, qui intervient de préférence pendant les heures creuses, il permet d'accroître la production brute en complétant le remplissage du bassin à pleine mer et sa vidange en basse mer, puis en turbinant sous une plus forte chute l'eau ainsi pompée sous une très faible chute.

Parallèlement à ces études théoriques sur les méthodes d'exploitation des usines marémotrices, des groupes axiaux turbines-pompes réversibles (groupes-bulbes), possédant les propriétés nécessaires, étaient mis au point et essayés dans plusieurs usines hydroélectriques d'E.D.F. (Cambeyrac, Argentat, Beaumont-Monteux). Le dernier prototype, le plus proche des groupes devant équiper l'usine marémotrice, a été essayé dans les environs



immédiats de la Rance en utilisant une ancienne écluse désaffectée du port de St-Malo. Placé entre les bassins du port et la mer, le groupe expérimental de St-Malo a pu réaliser tous les fonctionnements prévus; subissant la même ambiance maritime, il a permis d'éprouver les dispositions retenues, après plusieurs années d'études et essais approfondis, pour protéger le groupe contre la corrosion. De délicates mesures de rendement faites sur ce groupe ont permis enfin de vérifier les résultats fournis par les essais sur modèle réduit.

En service depuis plus d'un an, le groupe de St-Malo a apporté une confirmation éclatante de la valeur des solutions techniques adoptées. La faculté d'adaptation des pales de la roue à tous les fonctionnements et la souplesse avec laquelle se réalisent toutes les transitions ont été particulièrement remarquées. Le succès de cette expérience a été essentiel dans la décision de mise en chantier les travaux de la Rance.

L'aménagement de la Rance

L'usine marémotrice est implantée entre la pointe de la Briantais, rive droite, et la pointe de la Brebis, rive gauche; la largeur de la Rance à cet endroit est de 750 m environ. Le tracé passe sur l'îlot de Chalibert. Les sondages ont montré que le lit était constitué par une roche granitique, sous quelques mètres d'alluvions. Les fonds les plus profonds sont à 12 m sous le zéro des cartes marines.

La retenue s'étend jusqu'à l'écluse du Chatellier, près de Dinan. La superficie du bassin est de 22 km² et le volume de la retenue de 184 millions de m³ utilisables.

Les ouvrages comprennent: un barrage mobile, entre la rive droite et l'îlot de Chalibert, analogue aux barrages de basse chute en mer, dont les 6 pertuis ont un débouché total utile de 900 m²; une écluse de 65 m de longueur sur la rive gauche, dans la pointe de la Brebis, et sous laquelle passe la galerie d'accès à l'usine; l'usine proprement dite, longue de 390 m, immédiatement à droite de l'écluse; une digue morte entre l'extrémité est de l'usine et l'îlot de Chalibert; enfin, un poste de départ rive gauche, raccordé avec les trois transformateurs situés dans l'usine.

L'usine se présente comme une digue creuse. Le toit, constitué par une voûte, donne naissance à des poussées en sens inverse de celles de l'eau.

A l'intérieur de l'usine sont installés 24 groupes-bulbes de 10 000 kW (puissance totale 240 000 kW). La production annuelle s'élèvera à 560 millions de kWh.

Des dizaines de milliards de kWh

Les études sur les modes d'exploitation des usines marémotrices et les perfectionnements de toutes sortes apportés au projet initial de 1952 ont fait de la Rance un aménagement dont le taux de rentabilité est tout à fait comparable à celui des usines hydroélectriques construites par ailleurs par E.D.F. Il est à peu près certain toutefois que si cette réalisation ne pouvait être que sans lendemain elle n'aurait pas justifié à elle seule la somme d'efforts intellectuels qui ont été et seront encore dépensés pour elle. Or il existe la possibilité de réaliser dans la même région des aménagements d'une rentabilité analogue et pouvant donner des productions de plusieurs dizaines de milliards de kWh.

En même temps qu'elle étudiait la Rance, E.D.F. exécutait les études préliminaires pour s'assurer de la réalité de ces possibilités.

Ces études ont comporté notamment des recherches délicates sur la modification de la marée que provoqueraient des aménagements marémoteurs de grande puissance. Elles ont nécessité la construction de plusieurs modèles hydrauliques montés sur des plates-formes animées d'une rotation autour d'un axe vertical pour tenir compte de l'effet de la rotation de la terre, non représenté correctement sur un modèle fixe ordinaire.

Une option sur le futur

Bien que ces études ne soient pas encore achevées, il est déjà certain que la modification de la marée ne peut en aucune mesure être un empêchement à la réalisation des plus grands projets envisagés d'usines marémotrices. Des reconnaissances très approfondies des fonds marins ont été effectuées aux emplacements envisagés pour les usines. Électricité de France dispose donc actuellement des principales informations lui permettant l'établissement de projets de nouvelles usines marémotrices.

Cependant ces autres réalisations ne paraissent pas très prochaines car les récentes découvertes d'hydrocarbures et les perspectives de développement de l'énergie nucléaire n'imposent pas actuellement de recourir massivement à une nouvelle source d'énergie.

Mais en réalisant l'usine de la Rance, l'Électricité de France a pris une option sur l'utilisation de l'énergie des marées que l'expérience de la construction et de l'exploitation de cette première usine lui permettront de lever éventuellement le moment venu en toute certitude.

de l'électricité par des techniques d'avant-garde

Les piles à combustibles

LES piles à combustibles, dénommées couramment « fuel-cells » dans la littérature anglo-américaine, sont des générateurs de courant continu qui transforment l'énergie chimique en énergie électrique; elles diffèrent profondément des piles et accumulateurs par le fait qu'elles consomment un « combustible » qui peut être stocké en quantités en principe illimitées (bouteilles d'hydrogène comprimé par exemple).

Une « pile à combustible » n'est rien d'autre dans son principe qu'une cuve à électrolyse fonctionnant en sens inverse.

Effectuons, par exemple, l'électrolyse d'une solution de potasse dans l'eau avec des électrodes en charbon. Le courant électrique circule de l'anode

Le tracteur
expérimental
Allis-Chalmers
pèse 2 370 kg
et exerce un effort
de traction à la barre
de 1 350 kg.
Il est équipé
d'un moteur à courant
continu de 20 ch
alimenté
par 1 008 cellules
à propane et oxygène.



(positive) vers la cathode (négative) et provoque, en présence de la potasse, une décomposition de l'eau : de l'hydrogène se dégage sur la cathode, tandis que de l'oxygène apparaît sur l'anode. Ces gaz peuvent être recueillis en quantités indéfinies pourvu que l'on alimente la cuve, non pas en potasse, mais en eau.

Notre électrolyse a transformé l'énergie électrique en énergie chimique « potentielle » en décomposant l'eau en ses éléments.

Cette énergie ainsi mise en réserve peut réapparaître brutalement sous forme de chaleur : c'est ce qui se passe si nous mélangeons les deux gaz et si nous produisons une étincelle. Mais la théorie prévoit — et l'expérience justifie — qu'il est possible aussi de transformer directement l'énergie chimique potentielle en électricité, c'est-à-dire de recombiner l'hydrogène et l'oxygène sans dégager de chaleur et en fournissant de l'électricité.

L'électrolyse est, en effet, un phénomène réversible, et il suffit d'amener les gaz hydrogène et oxygène en contact chacun avec une électrode pour produire du courant, qui circule alors évidemment en sens inverse du courant d'électrolyse. Cependant, cet effet ne peut donner qu'un débit d'électricité extrêmement faible avec des électrodes ordinaires, car il nécessite un contact intime et

simultané des trois « phases » solide (électrode), liquide (électrolyte) et gaz, et ce contact ne se trouve réalisé, en l'absence de précautions particulières, que sur des étendues très petites. Ainsi, si une électrode émerge dans une éprouvette contenant un gaz, le triple contact n'a lieu que sur la ligne d'intersection de l'électrode avec la surface libre du liquide.

Du point de vue pratique, la condition nécessaire pour assurer la réversibilité de l'électrolyse, c'est-à-dire le fonctionnement d'une « pile à combustible » avec un débit intéressant, est de pouvoir mettre en présence les trois phases mentionnées sur une grande étendue. C'est aussi la principale difficulté technique. On est conduit, pour la surmonter, à employer des électrodes poreuses, en contact sur une face avec le « combustible » (hydrogène) ou le « comburant » (oxygène) et sur l'autre avec l'électrolyte.

Les piles expérimentales

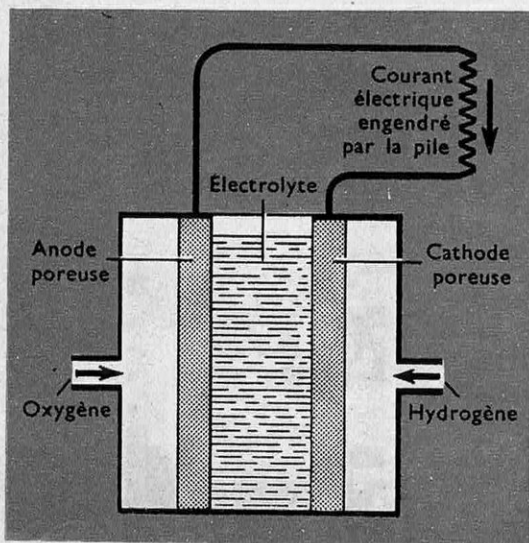
Les piles à combustibles sont susceptibles, théoriquement du moins, de « brûler » des combustibles très divers : hydrogène, hydrocarbures, charbon, etc. Leur rendement peut être élevé, car il n'est pas limité par la dégradation calorifique.

L'état actuel des réalisations en matière de piles à combustibles est le suivant :

La technique est déjà assez avancée en ce qui concerne les piles à hydrogène et oxygène, brûlant de l'hydrogène très pur avec un électrolyte liquide. La pile Bacon comporte deux électrodes en nickel poreux fritté. L'électrolyte est une solution de potasse à environ 30 %. Cette pile, conçue il y a 25 ans, a été perfectionnée depuis ; elle est exploitée industriellement aux États-Unis. Elle fonctionne à haute température (200° C) et sous une pression de l'ordre de 30 kg/cm².

La National Carbon Co a réalisé d'importants progrès en construisant une pile du même type fonctionnant à 60° sous 10 kg/cm², et utilisant l'air à la place de l'oxygène. C'est ainsi qu'a été conçue l'alimentation de la « sentinelle silencieuse », petit radar portatif de l'armée américaine. D'autres améliorations ont été apportées par la General Electric Company, qui a pu réaliser un générateur portatif de 13 kg, utilisable par les services de transmission de l'armée.

D'autres types de piles fonctionnent d'une manière très satisfaisante avec des électrolytes fondus (carbonates de métaux alcalins), à une température de 500 à 800° C. Elles peuvent brûler des fluides variés comme l'oxyde de carbone, le butane, le kérosène. Les principales réalisations sont celles de la



UNE PILE A COMBUSTIBLE ou « fuel-cell » comporte essentiellement un bac contenant un électrolyte caustique, par exemple, potasse, et deux électrodes poreuses qui ne sont pas nécessairement identiques. Le combustible (ici de l'hydrogène) et le comburant (ici de l'oxygène) sont amenés en contact avec l'électrolyte à travers les électrodes.

Consolidation Coal Co, qui brûle de l'oxyde de carbone avec un rendement de 60 à 70 %, et les piles Davtyan, développées en U.R.S.S. depuis une vingtaine d'années, et qui brûlent de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone avec des électrodes en oxyde de fer et un verre fondu comme électrolyte.

Il serait évidemment intéressant de pouvoir brûler des hydrocarbures lourds, fuel-oil ou mazout : des recherches se poursuivent dans cette voie. Une autre réalisation de grand intérêt serait celle d'une pile brûlant du charbon pulvérisé. Il y a ici des difficultés de réalisation considérables et on n'entrevoit pas encore de solution immédiate.

L'avenir des piles à combustibles est très prometteur, et on peut dès à présent prévoir leur extension dans deux domaines différents : d'une part les appareils mobiles pour lesquels le problème du prix du combustible n'est pas toujours primordial, et d'autre part

les installations dans lesquelles ce prix doit être compétitif avec celui des autres sources industrielles.

Au premier domaine appartiennent les générateurs portatifs à usage militaire et l'alimentation des automobiles. On sait qu'un prototype d'automobile électrique à pile a été présenté au Salon de l'Automobile de 1959 à Chicago. Par ailleurs, la Société Allis-Chalmers a réalisé un tracteur à piles de 20 ch brûlant du propane.

Au second domaine appartient la réalisation de locomotives électriques et celle de centrales industrielles à piles : de telles centrales pourraient être installées à proximité des raffineries, dans lesquelles de l'hydrogène est disponible comme sous-produit du cracking, ou même à proximité des sources de gaz naturel. De grands progrès sont encore à faire avant de pouvoir assurer la rentabilité d'installations de ce type.

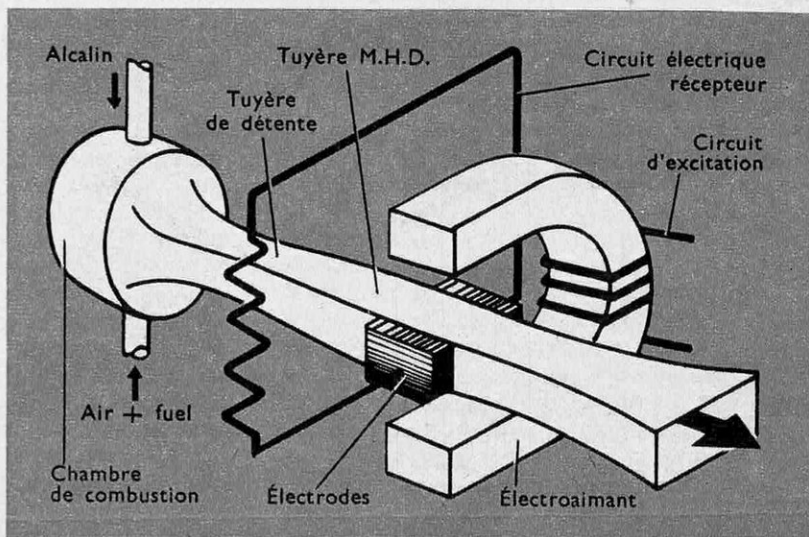
La magnétohydrodynamique

LA conversion directe et à grande échelle de l'énergie calorifique des gaz en électricité, sans avoir recours à des machines tournantes telles que les turbines à gaz ou à vapeur, est un problème que l'on se pose depuis longtemps. Sa solution permettrait d'affranchir les ingénieurs des sujétions technologiques dues à l'existence d'organes mobiles à haute température, sujétions qui limitent la température d'admission des fluides à environ 600° C dans le cas des turbines à vapeur, et à 800 ou 900° C

dans le cas des turbines à gaz terrestres ou aériennes utilisant la détente des produits de combustion. Une telle limitation se répercute, d'après le principe de Carnot, sur les rendements, lesquels atteignent environ 40 % pour les centrales thermiques les plus modernes. Mais si l'on suppose que l'on sait transformer directement la chaleur d'un gaz en électricité dans un appareil entièrement fixe, la difficulté signalée disparaît, et on peut envisager une température de « source chaude » très supérieure, donc un rendement

LE GÉNÉRATEUR MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE

comprend : une chambre où brûle du charbon ou un hydrocarbure additionné de sel alcalin ; une tuyère convergente-divergente ; une tuyère à section carrée légèrement divergente placée dans un champ magnétique intense ; un électroaimant produisant ce champ magnétique ; des électrodes recueillant le courant électrique et le délivrant au consommateur. Il y a transformation de l'énergie calorifique du gaz en énergie électrique.



thermodynamique sensiblement plus élevé.

La magnétohydrodynamique (que nous écrirons en abrégé M.H.D.) permet d'entrevoir une solution à ce problème.

On sait depuis Faraday que tout corps conducteur de l'électricité déplacé transversalement dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice susceptible de donner naissance, en circuit fermé, à un courant électrique. C'est ainsi qu'est produite la tension dans une génératrice classique, dynamo ou alternateur, dont les conducteurs coupent le champ magnétique de l'entrefer. Or cette propriété n'est pas l'apanage des corps solides : un jet de mercure lancé à travers un champ magnétique engendre, lui aussi, une force électromotrice. Enfin, il en serait de même pour un jet gazeux, à condition évidemment que le gaz soit bon conducteur du courant électrique.

Principe du générateur M.H.D.

Supposons que cette condition soit remplie. On peut chauffer le gaz, puis lui communiquer une vitesse suffisante à l'aide d'un ajutage convergent-divergent classique, comme cela est réalisé pour obtenir le vent dans les souffleries. L'énergie interne du gaz (chaleur) s'est alors transformée partiellement en énergie cinétique (vitesse). Ce jet gazeux est envoyé dans le champ magnétique qui le freine et l'énergie ainsi prélevée apparaît sous forme d'électricité, collectée au moyen d'électrodes placées le long du courant fluide.

Mais comment peut-on rendre un gaz bon conducteur ? Ce résultat peut être obtenu en provoquant l'apparition à l'intérieur de celui-ci d'une quantité suffisante d'ions positifs et négatifs, c'est-à-dire de particules chargées d'électricité. L'ionisation d'un gaz peut résulter de divers traitements, mais le procédé qui semble le plus réalisable dans la perspective actuelle consiste à le porter à une température suffisamment élevée après lui avoir incorporé une « semence » constituée par un sel alcalin plus aisément ionisable par échauffement que le gaz lui-même : ainsi, le calcul et l'expérience montrent qu'un gaz tel que l'azote, renfermant 1 % d'un sel de potassium, et porté à 3 000°, est suffisamment conducteur pour engendrer de l'énergie électrique lorsqu'il traverse à grande vitesse un champ magnétique intense. La conduction du gaz est pratiquement due uniquement aux électrons libérés par l'ionisation, en raison de leur mobilité, très supérieure à celle de molécules ionisées.

Ces quelques notions générales suffisent pour comprendre le principe des généra-

teurs M. H. D., qui sont pour le moment d'ailleurs seulement au stade des études et des petites maquettes de laboratoire. On utilise un gaz très chaud obtenu par combustion de charbon pulvérisé ou d'un hydrocarbure liquide (fuel) ou gazeux (gaz naturel) dans de l'air déjà fortement chauffé, jusqu'à environ 2 000°. Ce gaz de combustion passe dans une tuyère de détente où il prend une grande vitesse, de l'ordre de celle du son, 1 000 m/s si la température est de l'ordre de 3 000° C. Il est ensuite envoyé dans la « tuyère M.H.D. » qui constitue le générateur d'électricité proprement dit. Cet appareil peut être imaginé comme une conduite divergente de section carrée, dont deux faces parallèles sont constituées par un revêtement en briques réfractaires et les deux autres par des plaques conductrices, en tungstène par exemple.

Cette conduite est placée entre les pôles d'un puissant électroaimant, le champ magnétique étant transversal par rapport à l'écoulement du fluide et aux deux parois réfractaires de la conduite.

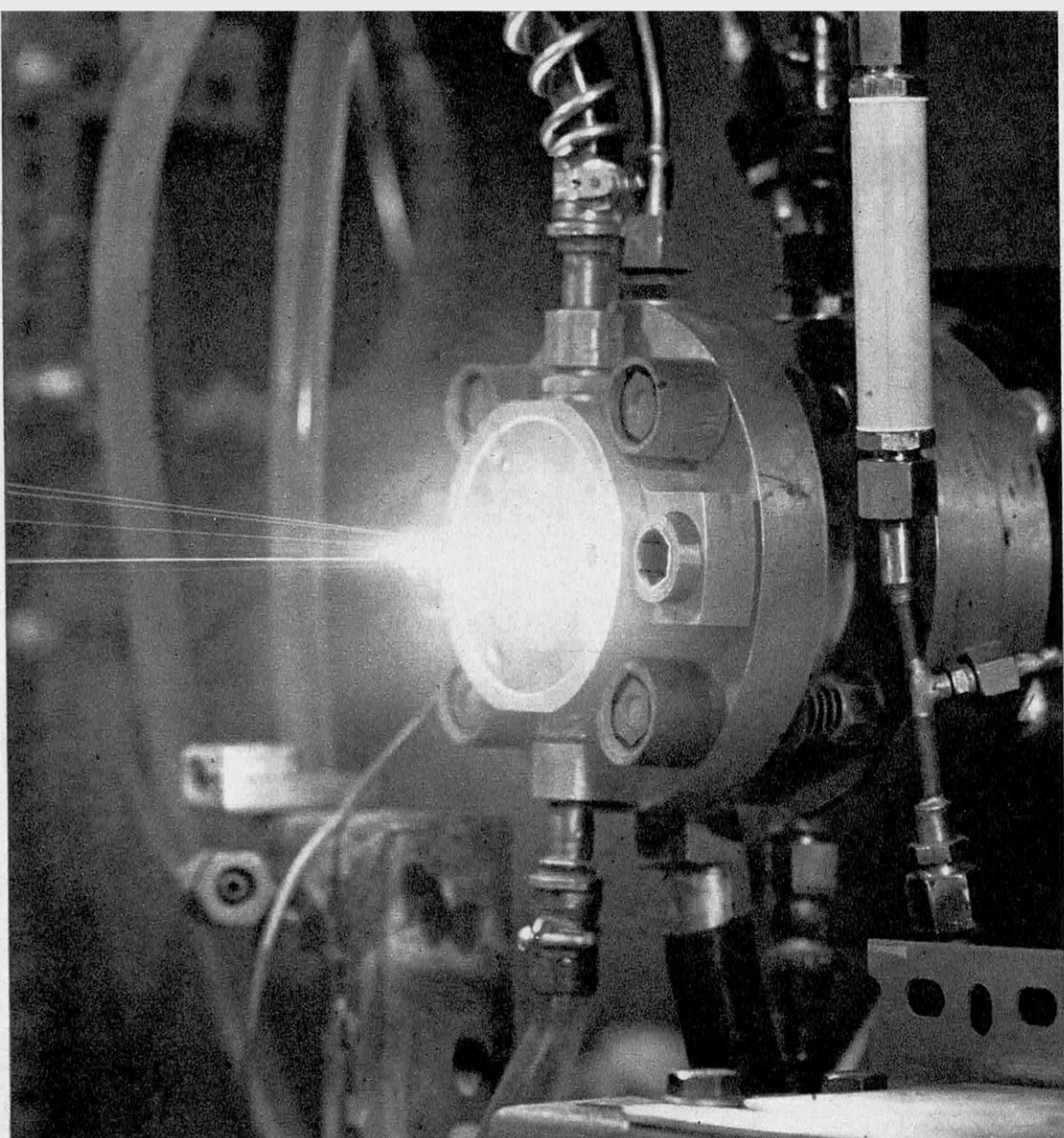
Les électrodes sont reliées extérieurement au circuit d'utilisation électrique (consommateur). Le gaz sortant de la tuyère M.H.D. s'est refroidi puisqu'une partie de son énergie a été transformée en énergie électrique. Cependant sa température est encore très élevée. Il passe alors dans un échangeur de chaleur permettant le réchauffage de l'air de combustion; enfin il est dirigé vers une centrale thermique classique où il abandonne sa chaleur résiduelle dans un second échangeur qui permet de vaporiser l'eau d'une chaudière. On doit noter que le générateur M.H.D. qui vient d'être décrit produit du courant continu qui pourrait être transformé en courant alternatif au moyen d'un mutateur.

Puissances et rendements

Quels sont les ordres de grandeur de la puissance et du rendement réalisables avec une semblable machine ?

Il y a de sérieuses raisons de penser qu'un tel appareil ne serait valable que pour une puissance importante, car vu les hautes températures exigées, les pertes de chaleur par convection et rayonnement seraient considérables pour des engins de petites dimensions dont le rapport surface/volume est nécessairement grand. Un générateur M.H.D. économiquement valable paraît à l'échelle de plusieurs centaines de milliers de kW, avec une tension de sortie de l'ordre de 1 000 V continus.

Pour chiffrer le rendement, il est néces-



LE PLASMATRON A ARC de 50 kW du Laboratoire de Recherches Balistiques et Aéronautiques de Vernon. L'arc électrique est soufflé par un violent courant de gaz qui, chauffé et ionisé, constitue un « plasma ».

saire de considérer, non pas le générateur M.H.D. seul, mais l'ensemble qu'il constitue avec la centrale classique associée. Le rendement de cet ensemble pourrait alors être, estime-t-on, de l'ordre de 55 à 60 %, ce qui représente, par rapport aux 40 % cités plus haut, un gain considérable.

Une autre variante du cycle M.H.D. consisterait à utiliser, non pas un gaz de combustion, mais un fluide inerte (argon par exemple) circulant en cycle fermé. La source chaude pourrait alors être, par exemple, un réacteur nucléaire cédant la chaleur au fluide au moyen d'un échangeur à haute température. Le gaz évoluerait ici suivant le circuit :

échangeur « haute température » — tuyère de détente — tuyère M.H.D. — récupérateur — échangeur « basse température » — source froide — compresseur — récupérateur — échangeur « haute température ». La « basse température » est encore suffisamment élevée pour que l'échangeur correspondant alimente une centrale thermique classique.

La réalisation de ce cycle constitue peut-être une solution d'avenir, utilisable lorsqu'on pourra réaliser des échangeurs à 3 000° et faire travailler les piles nucléaires à une température de cet ordre.

La géométrie propre de la tuyère M.H.D.

est susceptible de donner lieu à une grande diversité de réalisations : on peut imaginer, par exemple, la rotation du fluide dans un champ magnétique axial. On peut penser aussi utiliser comme champ magnétique, le propre champ du courant débité (générateur à auto-excitation). Enfin il n'est pas exclu de concevoir des machines « d'induction », sans électrodes, produisant directement du courant alternatif triphasé.

Il est encore trop tôt actuellement pour prévoir lesquelles, parmi toutes ces variantes, ou d'autres qu'on ne peut décrire ici, s'avèreront ultérieurement des solutions valables du point de vue de la technique et de l'économie.

Vers les réalisations industrielles

Mais quelle distance sépare ces projets d'une réalisation industrielle ? Les difficultés sont essentiellement — sinon uniquement — dues aux très hautes températures nécessaires pour disposer d'un fluide suffisamment conducteur de l'électricité.

Il faut d'abord *produire* ces hautes températures dans des conditions rentables : ceci paraît possible à partir de combustions classiques dans de l'air non enrichi en oxygène, à condition de préchauffer très fortement cet air. Il faut ensuite pouvoir *contenir* et faire évoluer le gaz, et ceci nécessite de disposer

de conduites réfractaires capables de résister en régime permanent à une température de 2 500 à 3 000°. Il y a enfin le problème de réalisation d'échangeurs de chaleur à très haute température, vers 2 000°, pour le préchauffage de l'air de combustion à partir des gaz brûlés.

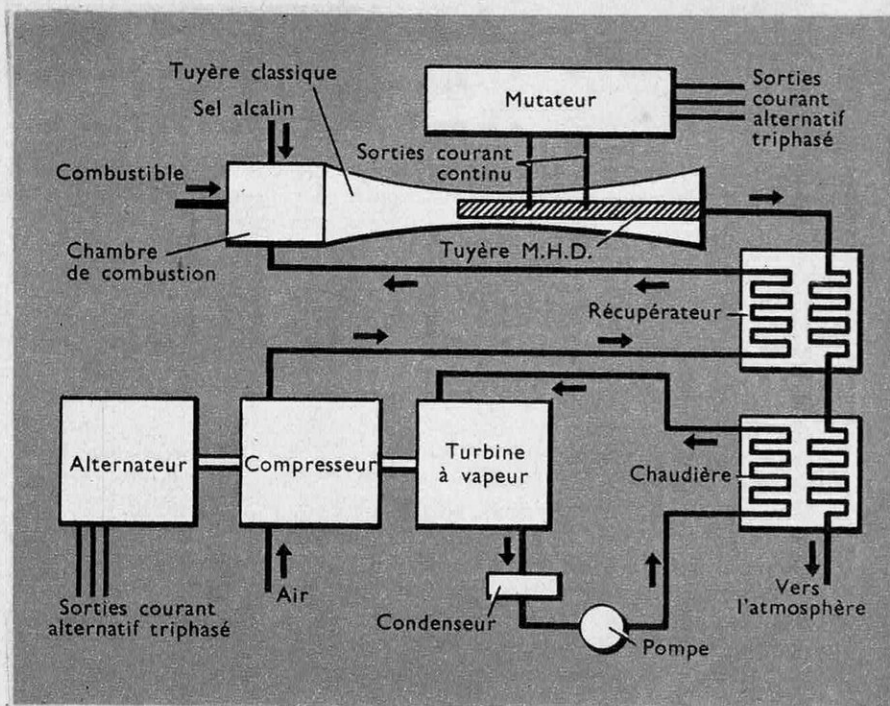
Ces difficultés sont grandes, mais ne semblent pas insurmontables à échéance d'un nombre d'années assez faible. S'il n'est pas encore question de réaliser un engin M.H.D. à échelle industrielle, du moins des appareils de laboratoire ont déjà été construits et sont en cours d'expérimentation. Aux U.S.A., les laboratoires de recherches de l'A.V.C.O. (Massachusetts) ont réalisé en 1959 un générateur M.H.D. de 10 kW, dans lequel le gaz chaud ionisé est fourni par un arc électrique. Un appareil du même genre a également été construit par la G.E.C.O. Ces appareils ne peuvent cependant fonctionner que pendant des durées très brèves, de l'ordre de quelques minutes consécutives.

Tout récemment, le laboratoire de recherches de Westinghouse (Pittsburgh) vient de construire un générateur M.H.D. d'une puissance analogue, mais fonctionnant à partir du gaz de combustion d'un fuel-oil dans l'oxygène. Les essais sont encourageants.

Ces études sont actuellement en cours au Commissariat à l'Énergie Atomique et à l'Électricité de France, en vue de construire

UN GÉNÉRATEUR M.H.D. A COMBUSTION

est ici associé à une centrale classique. Le combustible, mélangé à un sel alcalin, est brûlé dans de l'air préchauffé et détendu dans une tuyère classique. Il passe ensuite dans la tuyère M.H.D., puis dans le récupérateur, et enfin dans le bouilleur de la centrale avant d'être rejeté dans l'atmosphère. Le courant continu du générateur M. H. D. est transformé en courant alternatif dans un mutateur. Le rendement global peut atteindre 60%.



des prototypes de générateurs semblables.

La bonne conduite des expérimentations dans ce domaine nécessite de perfectionner les techniques de mesure de la température des gaz, de leur degré d'ionisation, de leur conductivité électrique, etc. Il faut en effet étudier d'une manière approfondie les propriétés des gaz ionisés très chauds, souvent désignés sous le nom de « plasmas ».

Les « plasmas »

Ce terme est utilisé actuellement pour désigner des états de la matière fort différents les uns des autres, ce qui peut parfois conduire à des confusions. Pour le physicien, un plasma est un gaz porté à une température suffisante pour qu'une partie ou la totalité de ses atomes et molécules soient dissociés spontanément en leurs constituants élémentaires. Cette définition englobe aussi bien le cas du fluide de 3 000° utilisable en M.H.D., dans lequel 1 % tout au plus des atomes ont perdu un électron et qui possède encore toutes les propriétés physiques et mécaniques d'un simple gaz chaud, et celui d'une substance portée à plusieurs millions de degrés, comme il s'en produit dans les explosions nucléaires ou à l'intérieur des étoiles. Dans une telle matière, il n'existe plus ni atomes ni molécules, tous les électrons ayant échappé à l'attraction des noyaux, et il n'y a plus

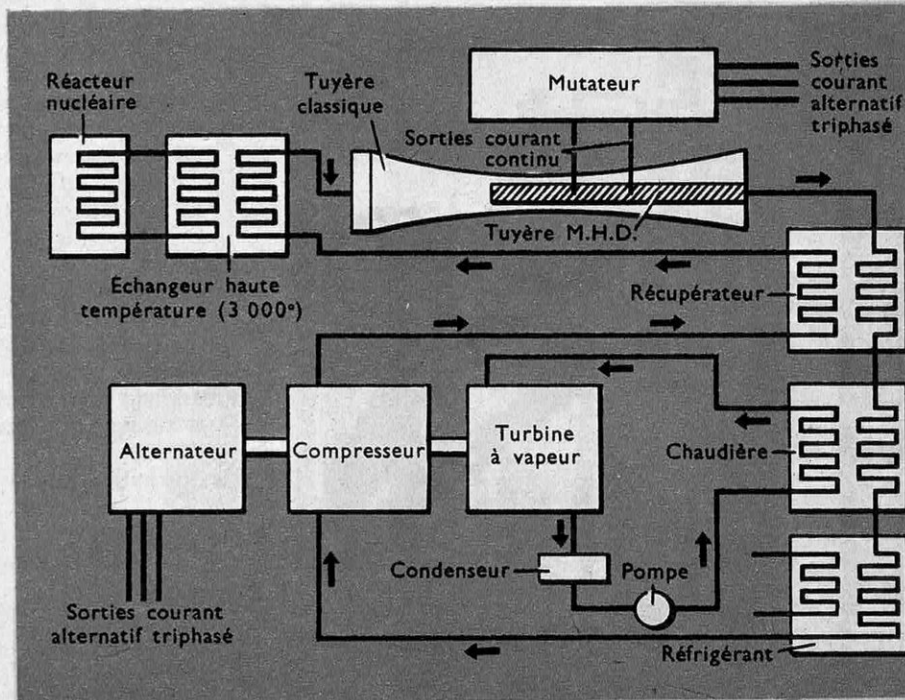
qu'un mélange de deux « gaz » : un gaz d'électrons et un gaz de noyaux positifs. C'est là véritablement un « quatrième état de la matière » auquel seulement on devrait réserver la dénomination de « plasma ».

Revenons au domaine de la M.H.D. Pour effectuer les recherches sur les gaz ionisés on opère sur des flammes engendrées à l'aide d'appareils dénommés « plasmatrone à arc » ; il s'agit simplement de générateurs d'arc électrique de grande puissance, l'arc étant entretenu dans un violent courant de gaz comprimé ; le gaz se trouve ainsi porté par l'arc à une température de plusieurs milliers de degrés.

Signalons pour terminer que les possibilités de la M.H.D. n'intéressent pas uniquement les producteurs d'énergie à destination industrielle. De tels générateurs peuvent être fort intéressants à bord des fusées en vue de permettre le passage du « mur de la chaleur » au moment de la rentrée de l'engin dans l'atmosphère terrestre. On sait en effet que l'air en contact avec le projectile se trouve alors porté à une température de plusieurs milliers de degrés par simple frottement contre les parois. Les études théoriques et expérimentales montrent qu'on peut tirer parti des forces exercées par un champ magnétique sur cet air pour réduire le frottement de la couche gazeuse et diminuer ainsi l'échauffement du missile.

ASSOCIÉ À UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE, le

générateur M.H.D. est ici à cycle fermé. La source chaude est l'échangeur à haute température, supposée atteindre 3 000° C. Le gaz inerte (argon, par exemple) sort de la tuyère pour traverser successivement un récupérateur et le bouilleur de la centrale thermique associée avant de parvenir à la source froide. Il est alors comprimé à nouveau, réchauffé dans le récupérateur, et parvient à l'échangeur de température du réacteur pour un nouveau cycle.





VENT, SOLEIL

L'énergie du vent

L'ÉNERGIE éolienne a été couramment utilisée depuis des temps très anciens. Tout le monde connaît les moulins à vent actionnant directement des meules à farine ou des pompes d'épuisement.

On sait moins qu'il y a encore une vingtaine d'années, de très nombreux agriculteurs isolés américains, et aussi français, possédaient de petites éoliennes entraînant une génératrice de plusieurs centaines de watts à quelques kilowatts au maximum, laquelle débitait sur des accumulateurs électriques.

Ce matériel disparaît de plus en plus, non en raison de sa fragilité car il s'est au contraire considérablement amélioré, mais parce que la puissance qu'il fournit est trop irrégulière pour satisfaire les besoins minimum actuels d'une exploitation agricole.

La grande irrégularité du vent, même dans les sites venteux, imposerait en effet, pour obtenir une alimentation continue, des accumulateurs de dimensions considérables et extrêmement onéreux.

Il paraît donc y avoir peu d'avenir pour les petites éoliennes, sauf peut-être dans des cas très particuliers comme les phares isolés en mer, dotés déjà d'accumulateurs électriques et surveillés en permanence par un personnel qualifié.

Mais l'irrégularité de la production d'énergie des aérogénérateurs cesse d'être un défaut rédhibitoire si au lieu de desservir une installation particulière, ils sont raccordés à un réseau interconnecté suffisamment important; il est indispensable cependant que le prix de revient moyen de cette énergie,

← **CET AÉROGÉNÉRATEUR** est actuellement en essais près de Chartres. Son hélice de 30 m de diamètre tourne à 47 tours/mn entraînant un alternateur placé dans une nacelle à 33 mètres au-dessus du sol. Il débite 640 kW environ par vent de 16 m/s.

ET CHALEUR TERRESTRE

de valeur médiocre puisque non régularisée, puisse se comparer à celui de l'énergie des usines hydrauliques au fil de l'eau, qui lui est à première vue assez comparable.

En fait, l'irrégularité du vent et du débit des rivières sont de nature assez différente. Leur cause initiale est la même : la variation des conditions atmosphériques. Mais alors que l'eau de pluie s'accumule naturellement dans le sol ou dans des réservoirs artificiels pour continuer à alimenter les rivières bien après la fin des précipitations, cette régularisation n'existe, pour le vent, ni naturellement ni artificiellement, de sorte que la puissance productible peut passer du maximum à zéro en quelques minutes. En contrepartie, les quantités moyennes d'énergie éolienne disponibles en chaque point paraissent, dans l'état actuel de nos connaissances, varier peu d'une année à l'autre. Des écarts par rapport à la moyenne de 30 % en plus et 20 % en moins sont sans doute exceptionnels et il n'existerait pas pour le vent l'équivalent des années exceptionnellement sèches auxquelles les accumulations naturelles et artificielles ne peuvent remédier.

Les grands aérogénérateurs

Les études faites en France pour abaisser le prix de revient de l'énergie éolienne ont porté sur la recherche des sites les plus venteux et sur la mise au point d'aérogénérateurs de grande puissance.

Qu'il existe des régions particulièrement ventées ne surprendra personne, mais elles diffèrent plus les unes des autres qu'on ne le pense parce que la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

La qualité du site, qui s'exprime en kWh par m² et par an, en supposant qu'on y a placé une éolienne de 1 m² de surface et de rendement unité, peut dépasser 4 000 dans certains sites maritimes exceptionnellement favorables, mais tombe fréquemment à des valeurs dix fois ou même cent fois moindres

dans des sites qui paraissent pourtant normalement ventés.

Ces valeurs, même les plus élevées, sont très faibles si on les compare à la production d'une turbine hydraulique de basse chute qui, rapportée à la surface balayée par la roue, atteint couramment des valeurs mille fois supérieures.

Pour avoir des puissances notables, les roues des aérogénérateurs devront donc avoir des dimensions considérables et leur réalisation pose des problèmes technologiques difficiles, d'autant plus qu'elles doivent supporter les poussées exceptionnelles produites par les tempêtes.

Le plus grand aérogénérateur expérimental qui ait été construit et essayé jusqu'à maintenant dans le monde possédait une hélice éolienne bipale de 53 m de diamètre et une génératrice synchrone de 1 250 kW alimentant le réseau général des U.S.A. Mais ceux-ci sont si riches en énergie qu'ils semblent avoir un peu abandonné aux Européens les progrès à espérer dans cette technique.

Dans notre pays, des recherches ont été aussi entreprises, mais jusqu'ici sur des appareils moins gigantesques. Deux aérogénérateurs d'essai ont été installés sur la côte ouest du Cotentin et près de Chartres.

Dans chacune de ces deux sites, on mesure la vitesse, la direction et la structure des vents à l'aide d'anémomètres et de girouettes directionnelles disposés à hauteur des axes des hélices, en avant de celles-ci ou sur des supports légers qui les entourent. Les programmes d'essais prévoient outre l'observation du comportement des ensembles sous l'action des agents atmosphériques, la détermination des caractéristiques des hélices dans le vent, l'enregistrement des contraintes locales auxquelles elles ou leur support se trouvent soumis et l'étude des vibrations.

On peut pas encore préjuger des résultats des expériences en cours et il faudra attendre plusieurs années avant qu'on soit réellement fixé sur le développement qui pourra être donné à l'utilisation de cette source d'énergie.

L'énergie solaire

L'ÉNERGIE rayonnée par le Soleil est offerte à l'homme en quantités pratiquement illimitées.

La principale difficulté qui s'oppose actuellement à son utilisation à une grande échelle (il faut mettre ici à part la question des « fours solaires », notamment la brillante réalisation française du Laboratoire de Montlouis, car ces appareils et leurs dérivés utilisent l'énergie solaire, mais ne produisent pas d'électricité) est la densité relativement faible du rayonnement reçu par la surface du sol : un peu plus de 1 kW/m^2 dans les meilleures conditions d'éclairement. Encore cette énergie n'est-elle disponible que pendant les durées d'ensoleillement; celles-ci varient largement suivant les situations géographiques : à Paris, l'ensoleillement moyen est de 1850 heures par an, contre près de 3 000 heures à Montlouis (Pyrénées-Orientales) et plus de 3 500 heures au Sahara.

Une usine transformant l'énergie solaire en électricité et fonctionnant avec un rendement de 100 % couvrirait au moins $1\,000 \text{ m}^2$ par milliers de kW, chiffre à décupler si le rendement est seulement de l'ordre de 10 %. L'énergie annuelle serait de l'ordre de 3 000 kWh par kW installé. Cette source d'énergie est susceptible de présenter un grand intérêt pour les pays neufs semi-désertiques.

dénusés de sources classiques d'électricité, mais jouissant d'un ensoleillement moyen très important. Par ailleurs, l'énergie solaire est la seule forme disponible sans épuisement à bord des satellites artificiels.

Les appareils capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique peuvent se subdiviser en trois catégories : les centrales thermiques solaires, les thermopiles et les piles photovoltaïques. Dans les deux premières catégories, la transformation énergétique passe par l'intermédiaire de la chaleur, dans la dernière, l'énergie lumineuse est directement transformée en électricité.

Centrales thermiques solaires

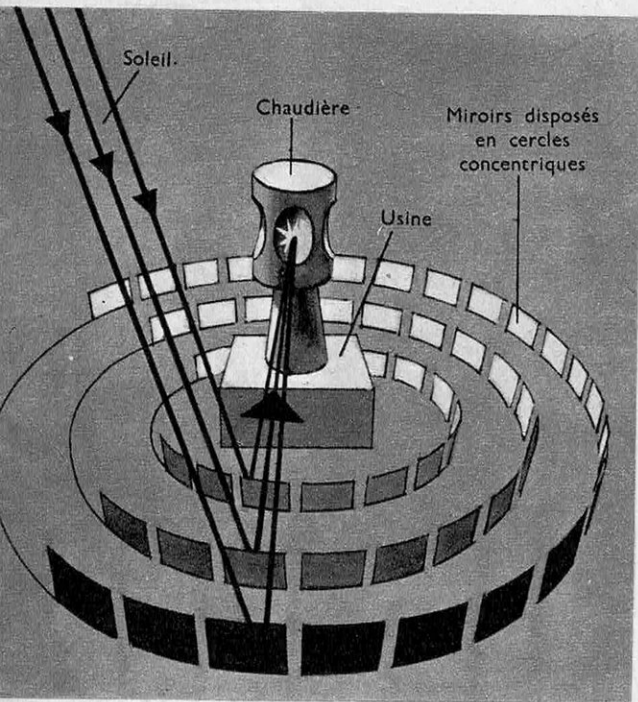
Dans une centrale thermique solaire, le rayonnement du soleil est concentré sur une chaudière à vapeur au moyen d'un ensemble de miroirs, et la vapeur fait fonctionner un turboalternateur classique.

Une réalisation relativement importante basée sur ce principe est en cours en U.R.S.S. à Ashkabad (Arménie). Le rayonnement solaire est reçu par un ensemble de 1293 miroirs plans, disposés suivant plusieurs circonférences concentriques. Chaque miroir, d'une surface de 15 m^2 est composé lui-même de 28 éléments. L'ensemble représente une surface réfléchissante de $20\,000 \text{ m}^2$. La lumière reçue est réfléchie vers une chaudière qui occupe le sommet d'une tour de 40 m de hauteur, dressée suivant l'axe des circonférences occupées par les miroirs. Cette chaudière est capable de produire 11 à 14 tonnes de vapeur à l'heure, à une température de 400°C , et sous une pression de 35 kg/cm^2 ; la vapeur entraîne une turbine de 1 200 kW. La production annuelle d'énergie pourrait être de l'ordre de 2 millions de kWh.

L'État d'Israël s'intéresse également au principe des centrales thermiques solaires (Negev Institute for Arid Zone Research).

Piles thermoélectriques

Les piles thermoélectriques fonctionnent comme les thermocouples bien connus des techniciens. Deux métaux différents sont mis en liaison par une soudure, l'un étant chauffé par le rayonnement solaire et l'autre maintenu



← **UNE CENTRALE ÉLECTRIQUE SOLAIRE** comporte ici schématiquement une chaudière surélevée sur les fenêtres de laquelle des cercles concentriques de miroirs renvoient à tout moment de la journée le rayonnement solaire incident. La vapeur ainsi produite va entraîner un turboalternateur.

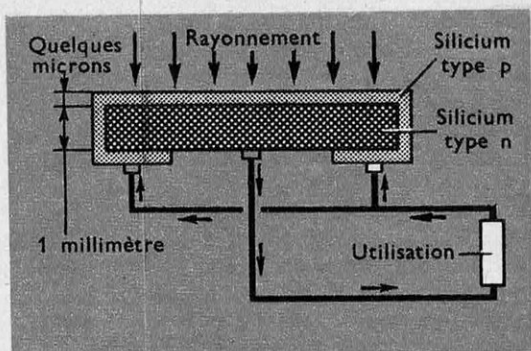
à la température ambiante; il en résulte une tension électrique de contact, proportionnelle à la différence de température des deux métaux. La tension recueillie aux bornes de la soudure est faible, par exemple 90 mV pour une différence de température de 300° si l'on utilise un couple zinc + antimoine/bismuth + antimoine, et le rendement est de l'ordre de quelques pour cent.

Des études actuellement en cours tant sur le plan théorique qu'expérimental font espérer la possibilité de performances nettement supérieures au moyen de couples métal/semi-conducteur, en employant par exemple comme substance semi-conductrice une « solution solide » à 25 % de sélénure de bismuth dans du tellure de bismuth. Un tel système fonctionnant avec une différence de température de 300° pourrait donner un rendement de 10 %. Enfin, des considérations théoriques autorisent à prévoir des rendements de l'ordre de 15 à 20 % lorsqu'on aura mis au point un alliage semi-conducteur pouvant être porté vers 700 ou 800° en conservant ses propriétés électriques.

Piles photovoltaïques

Les piles photovoltaïques, ou cellules photoélectriques, fonctionnent d'une manière tout à fait différente.

Ces appareils transforment directement le rayonnement en électricité, sans passer par



LA CELLULE AU SILICIUM est un monocristal de conductivité négative (type n) traité extérieurement en présence d'autres impuretés qui confèrent à sa surface une conductivité type p. En l'éclairant on recueille de l'électricité entre les zones p et n.

l'intermédiaire de la « dégradation calorifique », donc avec la possibilité théorique d'un rendement égal à l'unité — ce qui ne signifie pas cependant qu'on parvienne à atteindre ni même à approcher cette valeur avant longtemps.

Les cellules photoélectriques du commerce comportent une couche de sélénium déposée sur un support métallique. Elles fournissent un courant électrique par simple éclairage du sélénium, mais leur rendement est très bas, 1 % à peine. Les ingénieurs des « Bell Telephone Laboratories » ont mis au point en



CETTE MACHINE A COUDRE électrique exposée par Singer à Londres, reçoit l'énergie solaire sur une batterie de 144 cellules photovoltaïques au sélénium. Elle a effectivement fonctionné en Grèce et aux U.S.A.

1954 une nouvelle cellule photovoltaïque, d'un rendement dix fois meilleur. Cette cellule utilise les propriétés semi-conductrices des monocristaux de silicium.

Rappelons que l'on peut modifier la conductivité électrique du silicium, considéré à l'état très pur, en y ajoutant des doses infinitésimales d'impuretés convenablement choisies. Lorsqu'on forme un monocristal de silicium en solidifiant du silicium fondu en présence de traces de bore ou de gallium, on crée un milieu conducteur du type « p » dans lequel le passage du courant se fait par déplacement de centres *positifs*. Si au contraire on forme ce monocristal en présence de phosphore ou d'arsenic, on crée un conducteur du type « n », à conductivité *électronique*. Si l'on constitue un cristal moitié n et moitié p, la « jonction » entre les deux parties est semi-conductrice et ne laisse passer le courant que dans le sens p-n.

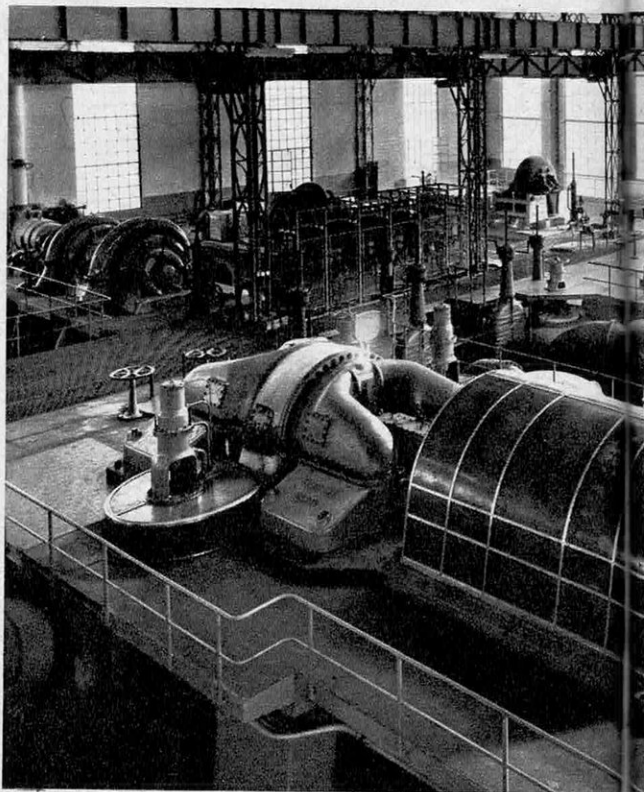
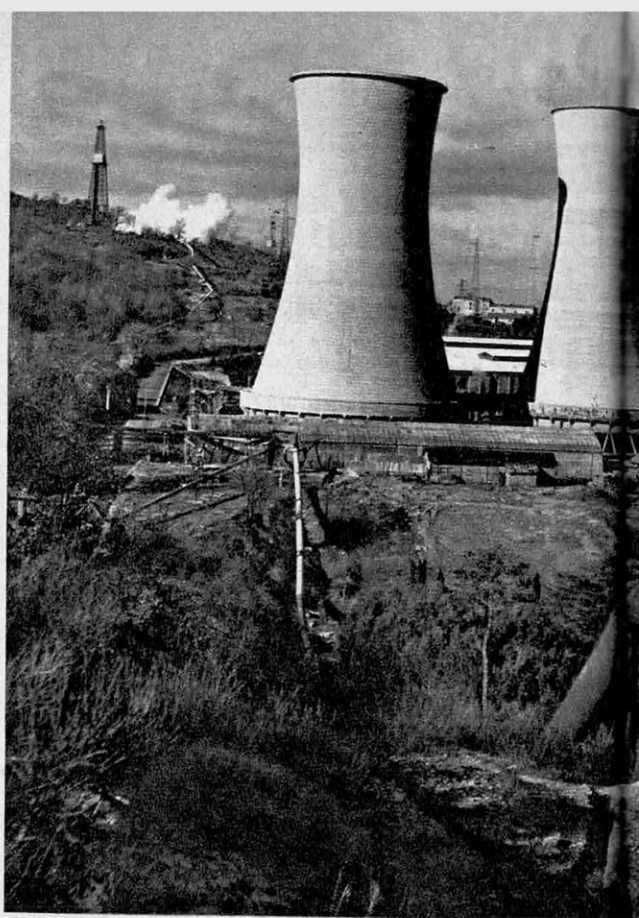
Un cristal de ce type est sensible à la lumière. La pile photovoltaïque Bell est obtenue à l'aide d'une lamelle monocristalline de silicium du type n, recouverte superficiellement sur toutes ses faces d'une couche p de quelques microns. L'une des faces de la lamelle est abrasée en son milieu pour mettre à nu la couche n. L'autre face est exposée au rayonnement. La tension électrique est recueillie entre les zones p et n. Ce système de piles est utilisé avec succès aux U.S.A. dans certains réseaux téléphoniques.

Une intéressante application des piles photovoltaïques est leur utilisation à bord des satellites artificiels. De telles piles équipent en effet différents satellites actuellement lancés. En général, elles sont disposées sur la surface d'ailettes extérieures et alimentent des accumulateurs intérieurs. La puissance réalisée est de l'ordre de 30 watts.

L'énergie géothermique

L'ÉNERGIE géothermique, qu'on a pu appeler la « houille rouge », se manifeste par le volcanisme et les différents phénomènes qui lui sont associés. Son origine est liée à la constitution même de la Terre, sur laquelle on n'a pas encore de certitude absolue.

D'une manière générale, on sait que la température s'accroît en moyenne à l'intérieur de l'écorce terrestre de 1° C tous les 30 mètres. On pourrait tirer parti de cette variation de température pour produire de l'électricité. Imaginons, par exemple, une





← Larderello N° 3

La plus récente des centrales géothermiques de Toscane. On voit les réfrigérants-tours de 70 m de haut et 52 m de diamètre à la base, et au-dessous la salle avec quatre turboalternateurs de 30 000 kW.

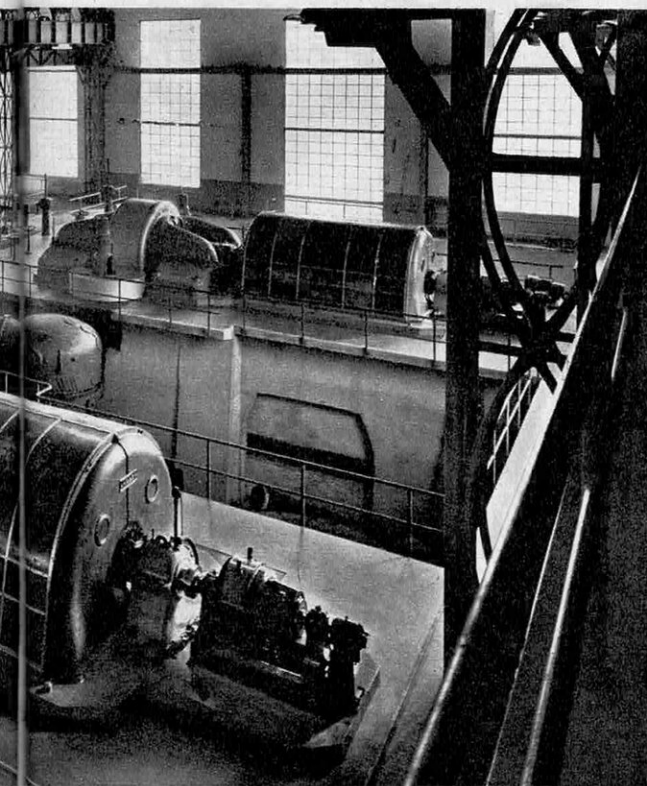
circulation de fluide entre la surface du sol et le fond d'un puits suffisamment long pour que la température y soit élevée. Le fluide, comprimé en surface puis envoyé au fond du puits pour s'y échauffer, pourrait ensuite être détendu au dehors dans une turbine, avant d'être refroidi puis renvoyé pour un nouveau cycle. Un tel système, analogue à celui déjà expérimenté pour exploiter la différence de température entre la surface des mers chaudes et les eaux profondes, serait grevé de frais d'installation élevés et ne pourrait pas être compétitif avec les sources classiques d'énergie, charbon ou houille blanche. Par contre, certains phénomènes naturels liés au volcanisme permettent de disposer économiquement en surface d'eau très chaude ou de vapeur sous pression jaillissant des profondeurs de la terre : soffioni, geysers. La construction d'une centrale thermique avec une source de ce genre peut être très rentable.

Une telle centrale fonctionne bien entendu sans chaudière, et la pression de vapeur peut être beaucoup plus faible que pour une usine classique. Elle ne comporte pas à proprement parler de condenseur, la vapeur condensée pouvant toutefois aider au refroidissement avant d'être rejetée. Des problèmes de corrosion peuvent se poser lorsque la vapeur contient des corps comme le soufre ou des particules solides en quantité importante.

La plus célèbre réalisation est celle du groupe de centrales de Larderello (Toscane) qui produit 250 000 kW. Elle utilise comme source d'énergie les « soffioni » ou jets de vapeur naturelle de cette région. La vapeur jaillit sous 40 kg/cm² à une température de 230°. Elle est détendue jusqu'à 3 ou 5 kg. La consommation est de 2 400 tonnes/h.

Une réalisation du même ordre de grandeur est en cours à Wairakei (Nouvelle-Zélande). La première tranche de cette centrale (69 000 kW) est en fonctionnement depuis 1958/1959. Une seconde tranche de 82 000 kW sera prochainement mise en service, la puissance totale n'étant atteinte qu'au terme d'une troisième étape.

En France, il ne semble pas exister de site se prêtant à la réalisation d'une centrale géothermique.



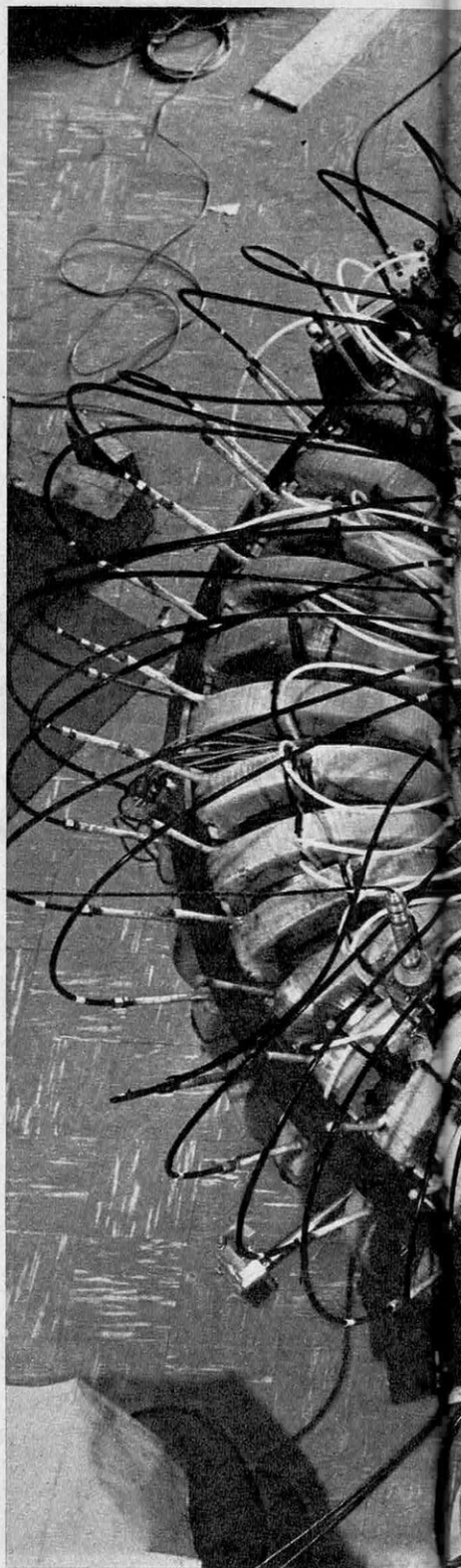
LA FUSION CONTRÔLÉE

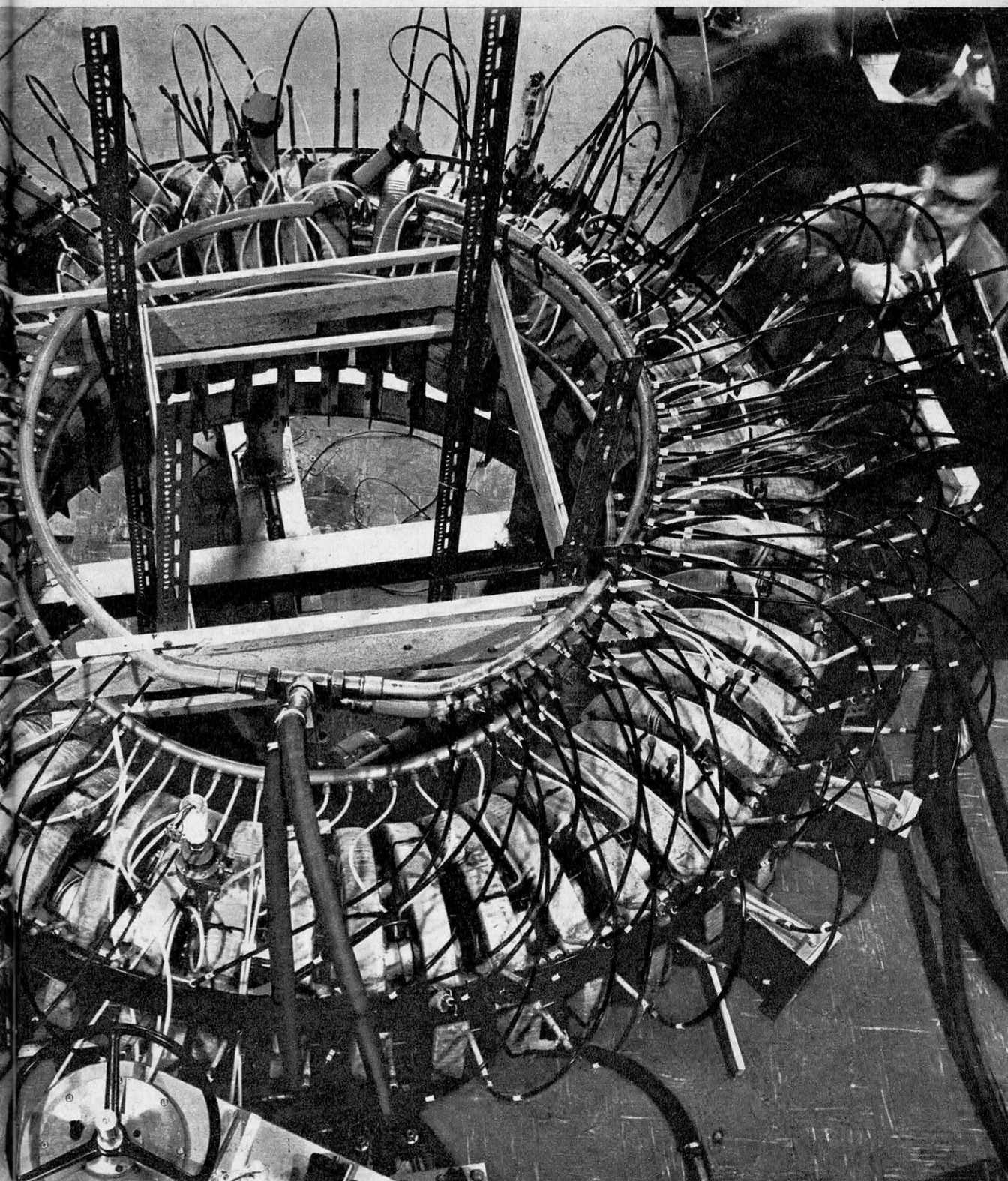
**Une réserve d'énergie
pratiquement inépuisable**

LA fusion nucléaire constitue une source d'énergie prodigieuse. Cette énergie est libérée de façon explosive dans la bombe H, mais pour une exploitation industrielle, il faudrait pouvoir contrôler à volonté les réactions de fusion. C'est la tâche à laquelle se sont attelés de nombreux laboratoires dans le monde.

Il est généralement admis que les réserves actuelles de combustibles classiques ne peuvent durer que quelques siècles et qu'il faut dès maintenant se préoccuper d'en assurer la relève. Les réserves mondiales d'uranium sont estimées à 25 millions de tonnes. Si l'on utilise seulement l'uranium 235 « fissile » avec recyclage du plutonium formé, on ne peut « brûler » que 3 % environ de l'uranium naturel (1 kg d'uranium naturel fournit ainsi environ 17 millions de kWh). On peut cependant espérer utiliser intégralement l'uranium naturel en transformant l'isotope 238 en plutonium. Même si l'on y parvient, en admettant que les besoins en énergie du monde doublent tous les dix ans et qu'ils soient satisfaits intégralement par la fission, les réserves seront épuisées en un peu plus d'un siècle.

Les réserves mondiales d'eau lourde, qui constitue 1,5/10 000 de l'eau des océans, sont estimées à 200 000 milliards de tonnes, dont 40 000 milliards de tonnes de





Le tore expérimental «Sceptre IV» en cours de construction à Aldermaston, en Grande-Bretagne, pour l'étude de la fusion nucléaire

Combustible utilisé	Durée si la consommation d'augmenter en 1960	Durée si la consommation double tous les 10 ans et cesse d'augmenter en l'an 2000	Durée si la consommation double tous les 10 ans et cesse d'augmenter en l'an 2060	Durée si la consommation double tous les 10 ans
$U^{235} + Pu^{239}$	7 000 ans	400 ans	100 ans (épuisé en 2060)	100 ans
U naturel intégralement utilisé	200 000 ans	12 000 ans	300 ans	140 ans
Deutérium	500 milliards d'années	30 milliards d'années	500 millions d'années	400 ans

deutérium. La fusion de 1 kg de deutérium produit 25 millions de kWh, de sorte que si l'énergie a été fournie par la fusion du deutérium dans les mêmes conditions que précédemment, il en restera assez dans un siècle pour encore... 500 millions d'années.

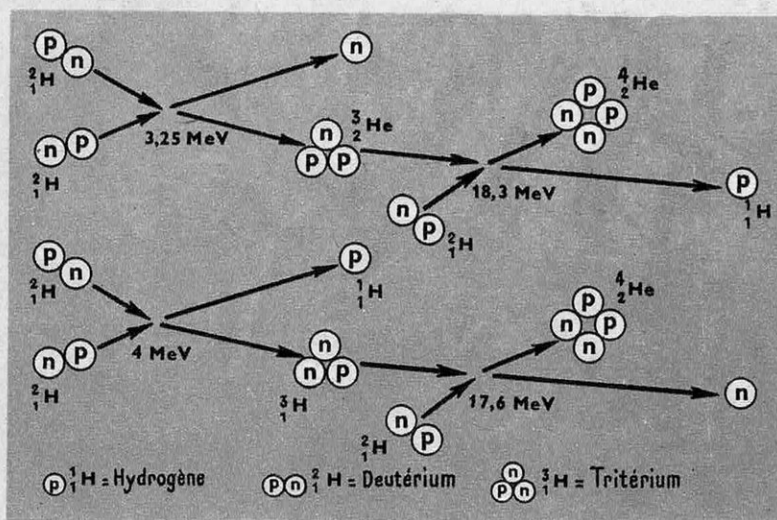
Réserves considérables, pas de déchets radioactifs dont le stockage pose des problèmes de plus en plus difficiles à résoudre, espoirs raisonnables de pouvoir transformer directement l'énergie libérée en électricité sans passer par le stade thermique : voici, résumés, les principaux avantages de la fusion.

La fusion des noyaux légers

La fusion est le processus par lequel deux noyaux atomiques légers s'unissent pour former un noyau plus lourd. Imaginons, par exemple, que deux noyaux de deutérium (hydrogène dit lourd) s'unissent pour former un

noyau d'hélium. Chaque noyau de deutérium possède un proton et un neutron, le noyau d'hélium possède deux protons et deux neutrons ; le nombre des particules est donc conservé. Cependant l'énergie de liaison, ciment du noyau, est plus grande dans le noyau d'hélium que dans le noyau de deutérium ; autrement dit, le noyau d'hélium est plus solide ; il faudrait plus d'énergie pour séparer ses quatre nucléons (protons et neutrons) que pour séparer les nucléons des deux atomes de deutérium. Il y a donc eu libération d'énergie lors de la fusion et la réaction est exothermique. L'énergie libérée est considérable par rapport à la quantité de matière utilisée : nous avons indiqué plus haut que la fusion de 1 kg de deutérium libère environ 25 millions de kWh ; c'est l'énergie que l'on obtiendrait en brûlant dans une centrale thermique 3 000 t de charbon !

Malgré son bilan largement positif, la ré-



DEUX CHAINES DE RÉ-ACTIONS de fusion dans le deutérium aboutissant à la formation d'hélium. L'énergie dégagée est évaluée en mégaelectronvolts ou millions d'électronvolts (1 MeV équivaut à $4,45 \times 10^{-20}$ kWh). Nombre de particules et charges se conservent. On a représenté à part les isotopes de l'hydrogène : hydrogène léger dont le noyau comporte un proton (p), deutérium avec un proton et un neutron (n), et tritium dont le noyau groupe un proton et deux neutrons.

action de fusion n'est pas spontanée, tant s'en faut : les deux noyaux étant chargés positivement ne peuvent se rapprocher suffisamment l'un de l'autre pour que la réaction se produise; il est nécessaire, pour vaincre la répulsion électrostatique ou « barrière de potentiel », de donner aux noyaux une énergie cinétique suffisante.

La répulsion électrique étant d'autant plus faible que le noyau est moins chargé électriquement, les réactions de fusion les plus intéressantes utiliseront donc l'hydrogène (charge unité) et ses isotopes, deutérium et tritium. Bien que les réactions deutérium + tritium soient les plus faciles à produire, c'est du deutérium pur qui est utilisé dans la plupart des essais de fusion, à cause du prix élevé du tritium.

La figure page 148 montre deux chaînes de réactions qui peuvent se produire avec des probabilités égales dans le deutérium.

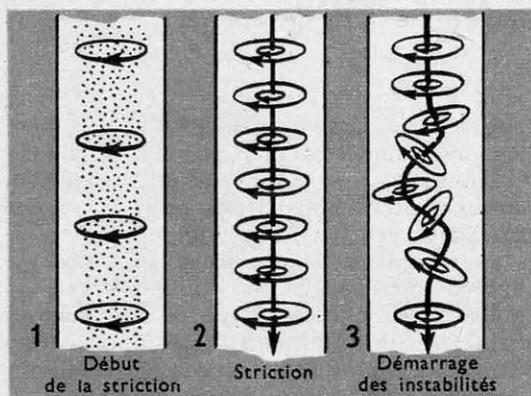
Le plasma

L'énergie cinétique nécessaire pour vaincre la barrière de potentiel est généralement fournie par agitation thermique, d'où le nom de « réactions thermonucléaires ». Porté à une température très élevée, un gaz s'ionise, c'est-à-dire que les noyaux perdent leurs électrons périphériques. L'hydrogène et le deutérium sont déjà complètement ionisés à 100 000°. On se trouve alors en présence d'un « plasma », mélange d'ions positifs et d'électrons négatifs en nombre égal, donc électriquement neutre; sa conductibilité varie avec la température : vers 10 millions de degrés, elle dépasse celle du cuivre.

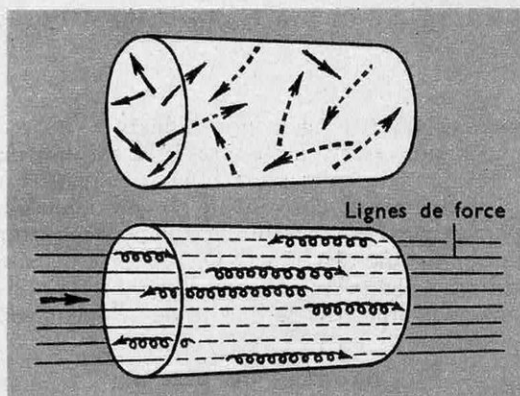
Le gaz exerce une pression, la pression cinétique, sur les parois de l'enceinte qui le contient. Pour maintenir cette pression dans des limites raisonnables aux températures thermonucléaires, il est nécessaire que la pression initiale dans le tube soit très réduite, de l'ordre de 1/10 000 d'atmosphère, ce qui correspond à une très faible densité gazeuse (de l'ordre de 10^{15} ions/cm³).

Le plasma chauffé doit se trouver éloigné des parois de l'enceinte car tout contact amènerait une perte de chaleur directe et une contamination du gaz par des impuretés. Même en admettant que le plasma soit parfaitement confiné, il y a une perte inévitable d'énergie sous forme de rayonnement : le rayonnement dit « Bremsstrahlung » dû au freinage brusque des électrons par les noyaux qu'ils rencontrent. On démontre aisément que la production d'énergie par fusion ne dépasserait la perte par « Bremsstrahlung » que pour des températures supérieures à 400 millions de degrés; la réaction serait alors auto-entretenue, l'énergie dégagée par fusion tendant à augmenter la température du plasma : c'est seulement au-dessus de cette « température critique » qu'on peut espérer obtenir de l'énergie utilisable (la question de récupérer cette énergie libérée sous forme d'énergie cinétique des particules chargées et des neutrons est un problème complexe que nous n'aborderons pas ici).

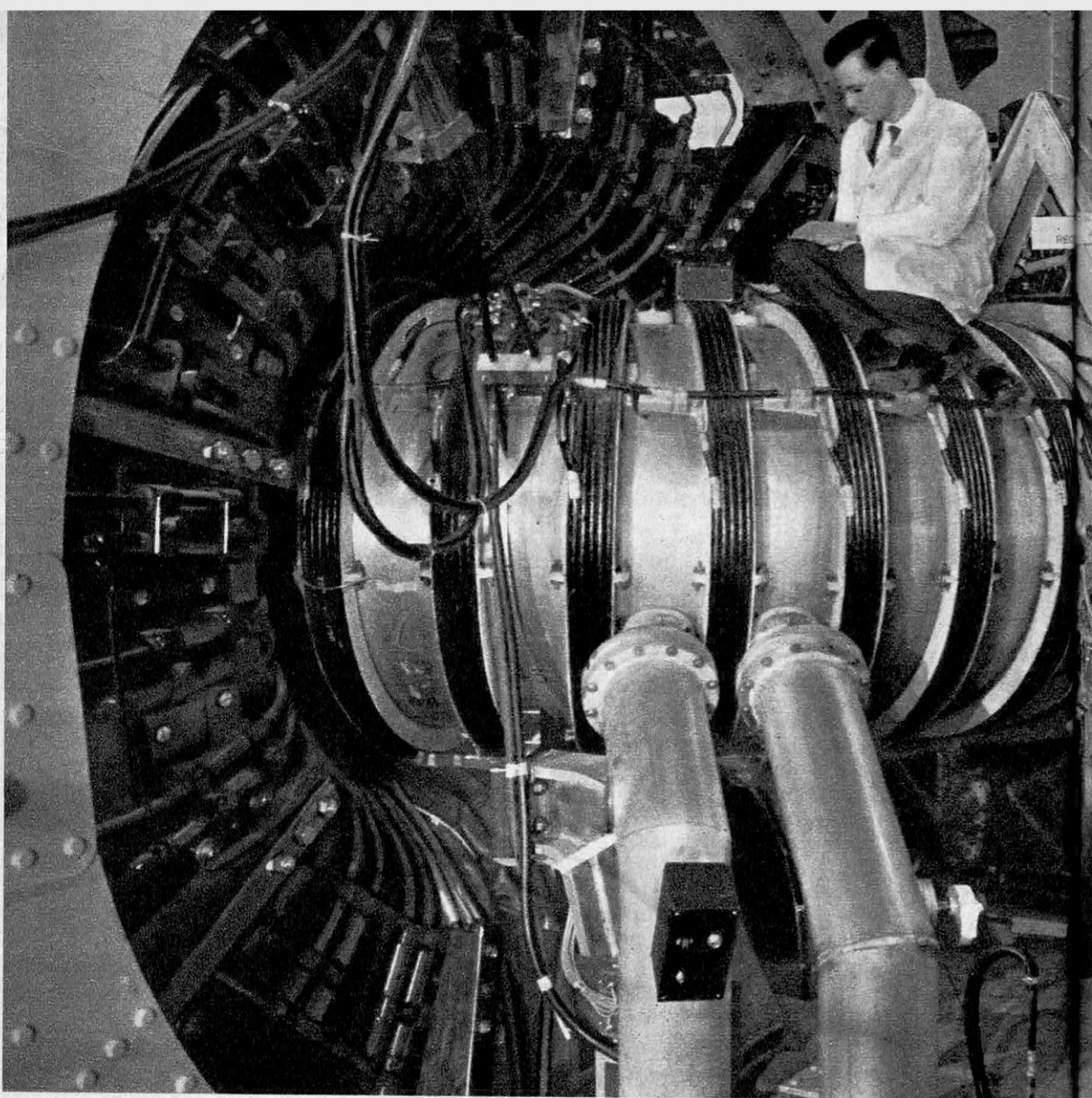
Quel que soit le dispositif employé, il est évident que le plasma ne restera pas isolé indéfiniment. On appelle « temps de confinement » le temps qu'il faudra en moyenne à un ion pour s'échapper hors de la zone où se trouve confiné le plasma. Ce temps doit être



LA STRICTION est provoquée par le passage d'un courant électrique à travers le plasma qui se resserre en un fin cordon (1,2). Mais ce dernier est instable normalement (3) et il se détruit très rapidement.



LE CONFINEMENT des ions obtenu grâce à un champ magnétique axial. Au lieu de se mouvoir d'une manière désordonnée (en haut), ils s'enroulent autour des lignes de force sans toucher les parois.



Le tore « Zeta » à Harwell, en Grande-Bretagne, de 1 m de diamètre et 9,40 m de circo

suffisamment long, sinon l'énergie libérée par fusion serait inférieure à la somme de l'énergie nécessaire pour amener le plasma à la température convenable et de l'énergie perdue par Bremsstrahlung. On peut montrer que pour une réaction D-D, avec une densité courante de 10^{15} ions/cm³, le temps de confinement doit être de l'ordre de 10 secondes.

Chauffage du plasma

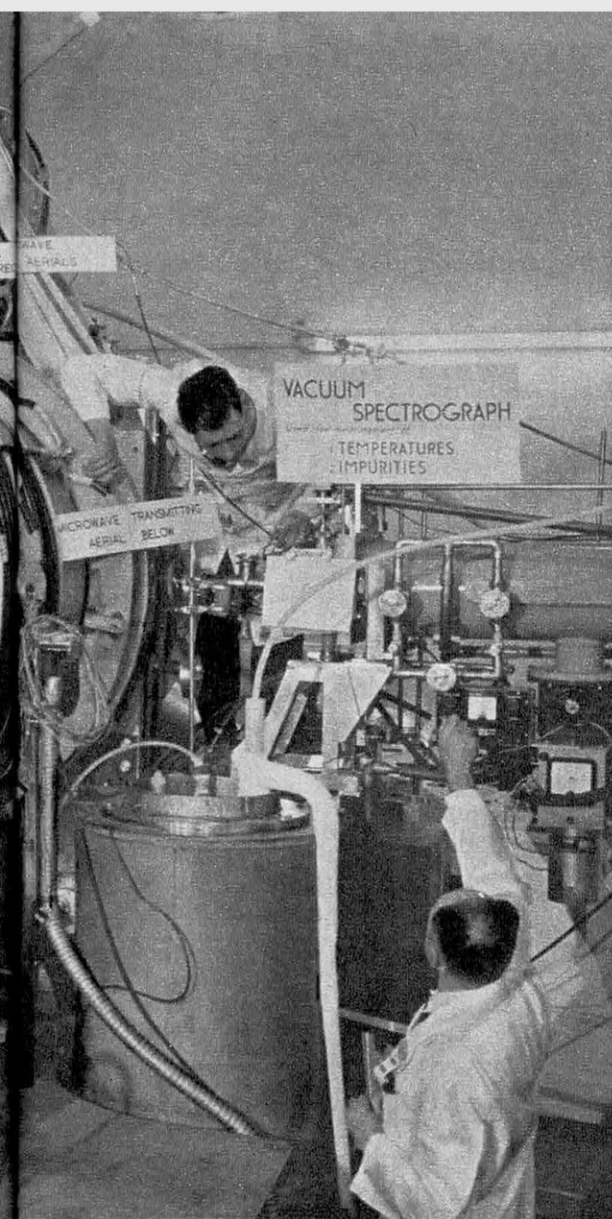
En résumé : pour réaliser un réacteur thermonucléaire rentable, il faut arriver à porter un plasma de densité aussi grande que possible à une température nettement supé-

rieure à 400 millions de degrés et maintenir les ions confinés pendant plusieurs secondes.

Nous allons voir, en passant rapidement en revue divers appareils expérimentaux, que ce résultat est loin d'être atteint.

Le chauffage du plasma ne nécessite pas une énergie considérable : pour porter à un milliard de degrés un litre de deutérium à faible densité (10^{15} ions/cm³) supposé parfaitement confiné, il ne faut pas plus d'énergie que pour porter un demi-litre d'eau à ébullition ! La difficulté est de trouver un moyen de transférer cette énergie au plasma.

Un premier chauffage est généralement obtenu par effet Joule, en faisant circuler un



conférence, un des plus grands du monde

courant à travers le plasma. Comme la résistivité décroît très vite avec la température, il est nécessaire d'utiliser de très fortes intensités, de l'ordre de quelques centaines de milliers d'ampères. Les appareils fonctionnent en impulsion, la source de courant (souvent une batterie de condensateurs) ne pouvant fournir en permanence la puissance nécessaire. Lorsque le plasma a été amené à une température élevée de l'ordre d'un million de degrés par effet Joule (ou par tout autre moyen), il est possible par d'autres méthodes d'augmenter encore sa température : par exemple, si l'on fait croître et décroître alternativement le champ magnétique externe de confinement ou de stabilisation dont nous allons parler, de l'énergie est cédée au plasma : c'est le « pompage magnétique », fréquemment employé.

Le confinement par striction

Si un courant électrique traverse le plasma, le champ magnétique qu'il engendre peut réaliser le confinement. L'interaction entre le courant même et le champ qu'il produit crée en chaque point du plasma une force électromagnétique radiale, dirigée vers l'intérieur du tube. Si ces forces sont supérieures à la pression cinétique, ce qui est le cas pour des valeurs élevées du courant, le plasma qui remplissait d'abord tout le tube se resserre en un fin cordon : c'est le « pinch-effect » ou « striction ». Il y a en même temps chauffage du plasma par effet Joule. La striction est nettement instable car le plasma se comporte comme un corps diamagnétique : il fuit les régions de champ magnétique intense.

Si le tube est droit, on fait circuler le courant entre deux électrodes ; s'il a la forme d'un tore, le courant est induit dans l'anneau gazeux jouant le rôle du secondaire d'un transformateur.

CONFINEMENT PAR STRICTION

		Diamètre (cm)	Long. ou circonf.	Millions de degrés
Linéaire	Colombus S 5 (Los Alamos, U.S.A.) ...	13	80	5
	Perhapsatron S 5 (Los Alamos, U.S.A.)	13	204	6
	Zeta (Harwell, G.-B.)	100	942	5
Toroïdale	Sceptre III (Aldermaston, G.-B.)	30	314	5
	Sceptre IV (Aldermaston, G.-B.)	30	628	
	Alpha (U.R.S.S.)	100	942	
	TA 2 000 (Fontenay, France)	30	628	
	Triax (Berkeley, U.S.A.)	10	50	5 (?)
Tubulaire	Levitron (Livermore, U.S.A.)	8 et 2		
	Tube droit (Fontenay, France)	20 et 5	120	

Les premiers appareils du type Perhapsatron utilisaient la striction lente résultant de la création dans le plasma d'une faible différence de potentiel. Ils ont permis de constater que la striction se détruisait très rapidement du fait des instabilités. On a alors proposé deux procédés différents. Par un chauffage extrêmement énergétique (« fast pinch ») grâce à un appareil de faible inductance créant des gradients de potentiel élevés à travers le plasma, on peut espérer atteindre les températures thermonucléaires avant le démarrage des instabilités et la destruction de la striction. On peut aussi stabiliser la décharge par un champ magnétique axial appliqué de l'extérieur et en entourant le récipient d'un tube métallique où sont induits des courants de

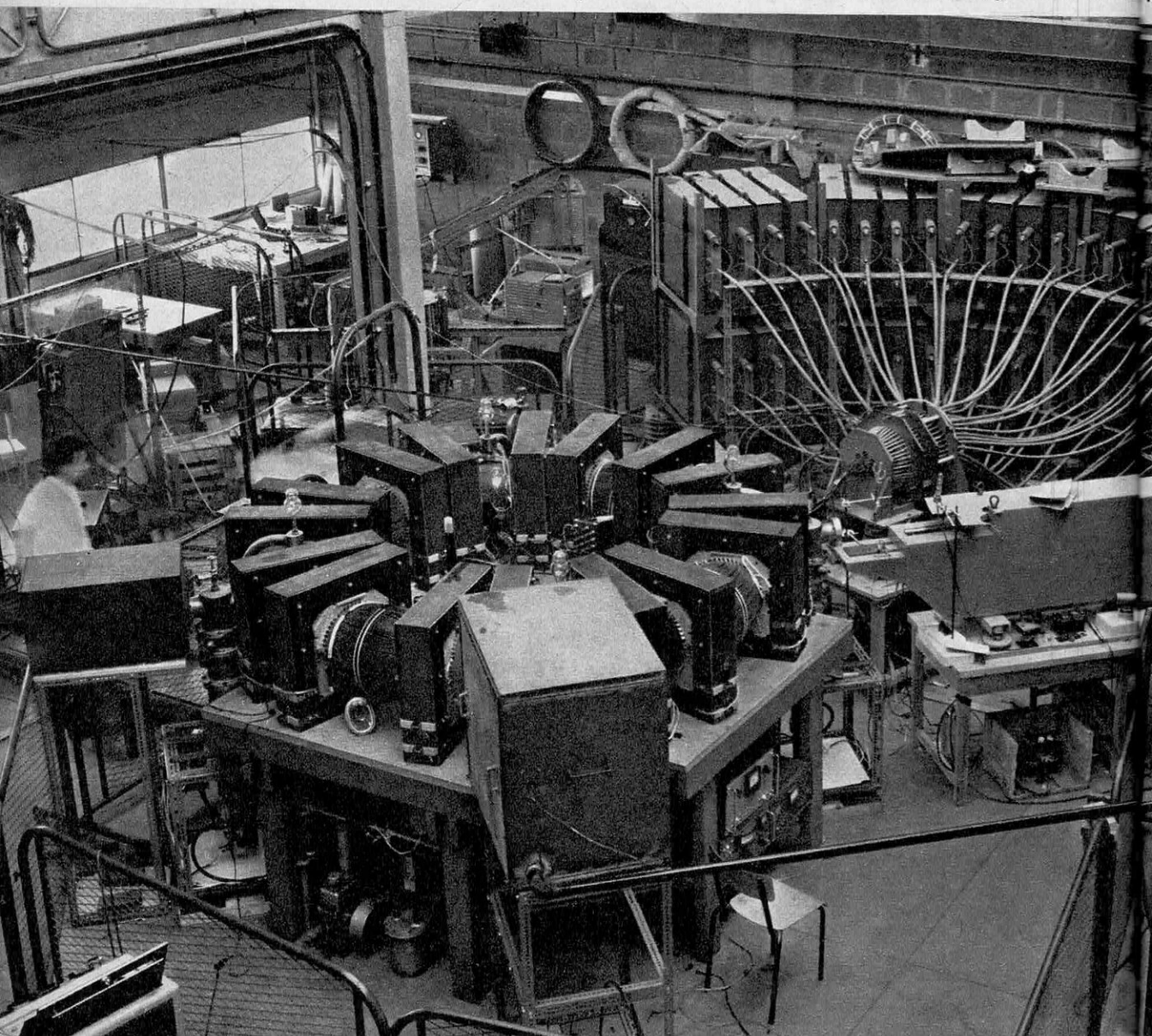
Foucault qui s'opposent aux déplacements; la striction se détruira quand même, mais au bout d'un temps beaucoup plus long (5 à 10 fois).

On peut encore obtenir une striction stable dans une enceinte formée de deux tubes métalliques coaxiaux : la décharge prend la forme d'un cylindre mince beaucoup moins sensible aux instabilités que le filament de plasma : c'est la striction tubulaire ou tri-axiale.

Les Stellarators

Lorsqu'à un plasma enfermé dans un tube cylindrique est appliqué un champ magnétique homogène dont les lignes de force sont

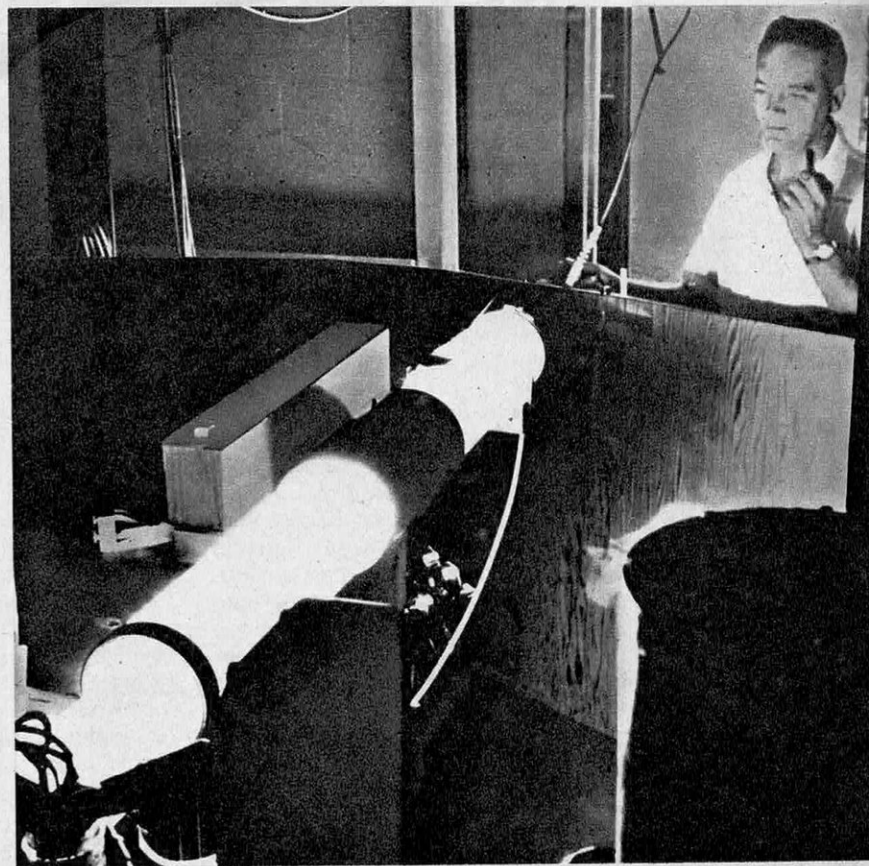
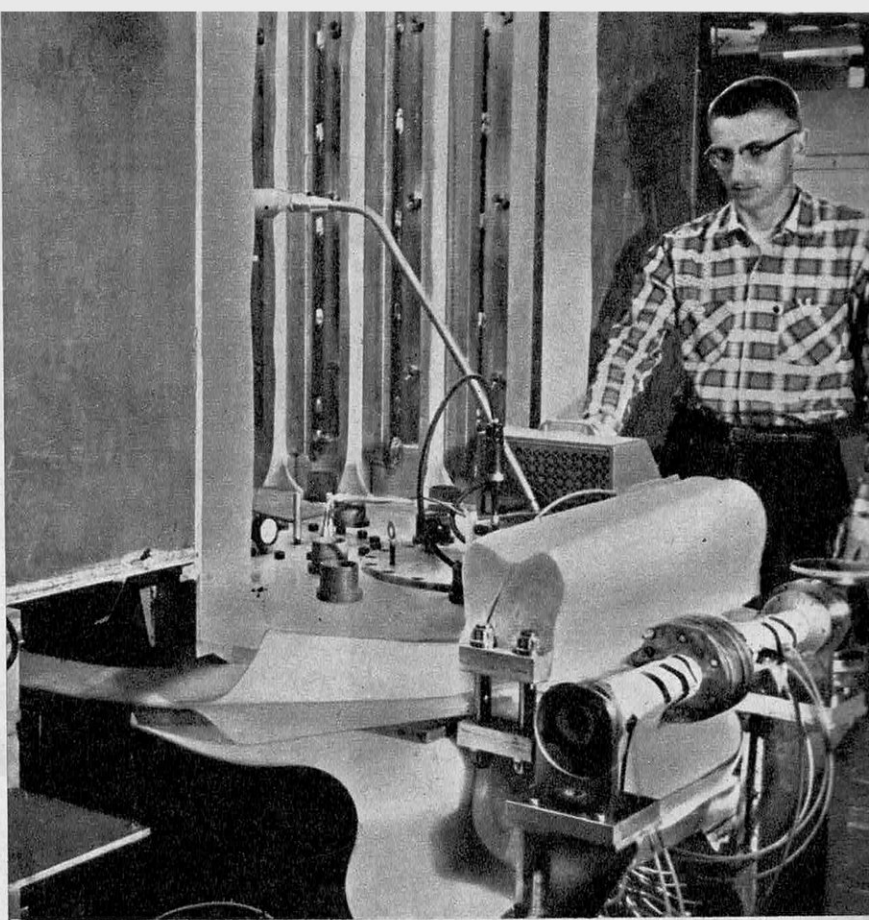
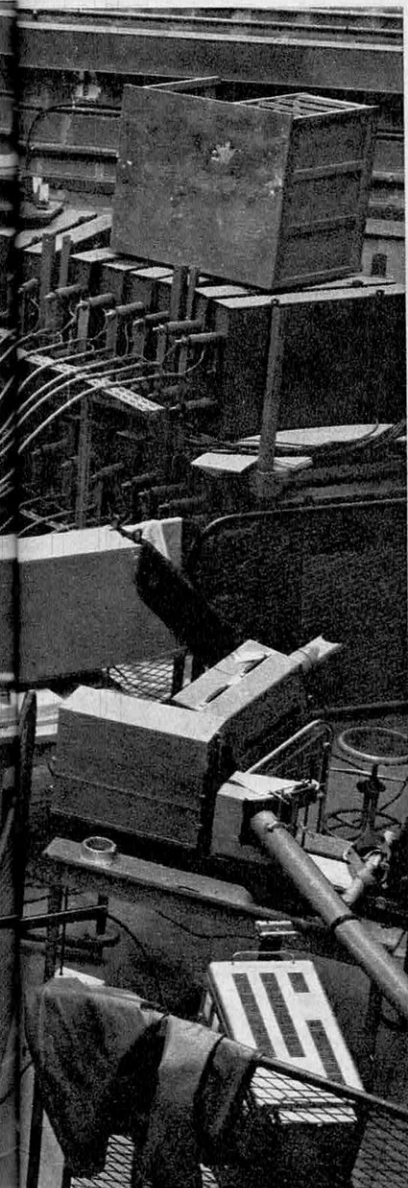
A Fontenay-aux-Roses, le tore TA 2000, pour l'étude de la striction stabilisée; dans le fond

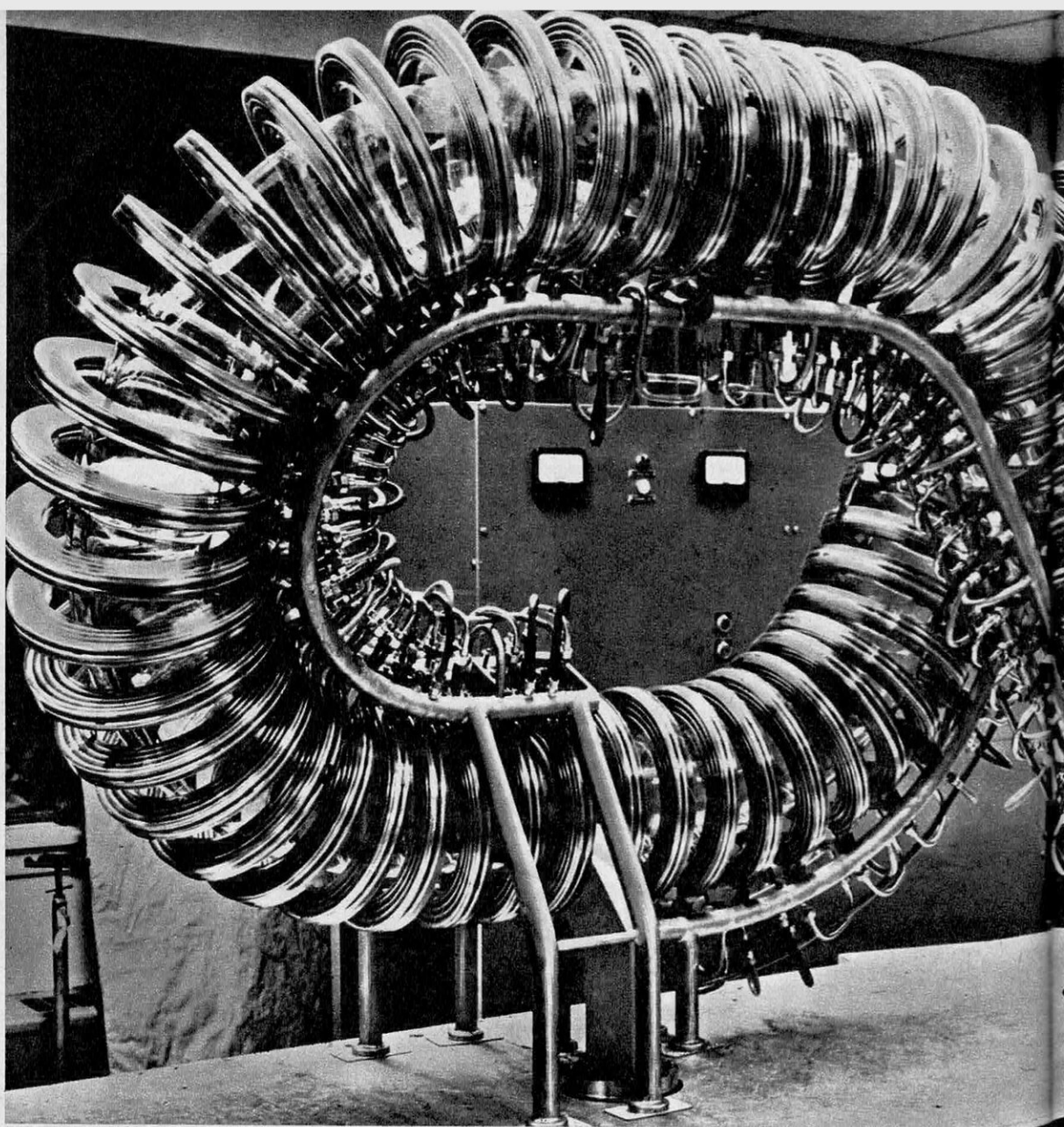


Deux récentes → machines américaines

Dans ce type d'appareils, il y a compression du plasma par un champ magnétique croissant très rapidement, résultant du passage d'un courant très intense dans une plaque cylindrique entourant le tube à décharge. Voici deux de ces appareils construits à Los Alamos. Ci-contre « Scylla II », où des réactions thermonucléaires paraissent réellement avoir été obtenues; le plasma est chauffé par onde de choc et compression adiabatique. Au-dessous, le « pinch orthogonal » et son émission lumineuse.

de la batterie de condensateurs



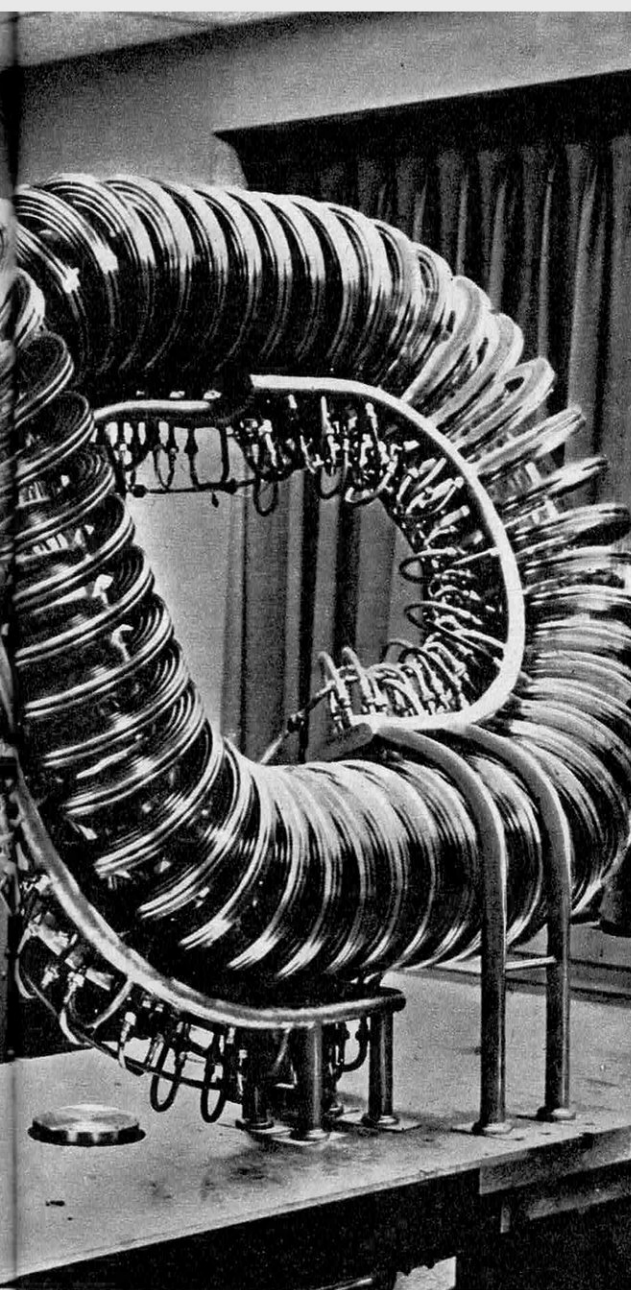


dirigées suivant l'axe du tube, les ions qui pouvaient, en l'absence de champ, se mouvoir dans une direction quelconque continuent à se déplacer librement dans la direction du champ mais ne peuvent plus se diriger vers les parois. Chacun d'eux est lié à une ligne de force autour de laquelle sa trajectoire s'enroule en hélice; plus le champ magnétique est intense, plus le rayon de courbure de la trajectoire est faible. Un ion ne peut diffuser vers les parois que par une série de collisions avec d'autres ions, chaque collision le faisant changer de ligne de force. La diffusion est très ralentie (sa vitesse est inversement proportionnelle au carré du champ magnétique)

et le plasma est maintenu écarté des parois.

Le champ peut être obtenu grâce à un enroulement bobiné autour du tube. Cependant, lorsque l'enceinte a la forme d'un tore, le champ produit par un tel enroulement n'est pas homogène et le confinement est instable; on a alors intérêt à utiliser un champ magnétique présentant une torsion, c'est-à-dire tel que ses lignes de force décrivent une hélice à large pas autour de l'axe du tube. Cette disposition est celle adoptée dans les appareils américains appelés Stellarators.

Dans les premiers appareils, la torsion était obtenue en donnant au tube la forme d'un huit. Les Stellarators A et B ont permis



← Stellarator en forme de huit

Dans ce modèle de « stellarator » présenté à la Conférence de Genève, les bobines produisant le champ sont réparties tout le long du tube. La torsion du champ, nécessaire pour obtenir un plasma stabilisé, est obtenue grâce à la forme en huit donnée au tore.

monstre qui n'aura pas moins de 160 mètres de long. Il sera à fonctionnement continu, et il est prévu pour produire une puissance de 5 millions de kW !

Miroirs magnétiques

Dans un tube rectiligne où le plasma est confiné par un champ axial extérieur, les ions peuvent s'échapper par les extrémités. On évite ces pertes en augmentant fortement la valeur du champ magnétique aux deux bouts du tube, ce qui resserre les lignes de force. Le mouvement hélicoïdal des ions autour d'elles comporte une composante axiale et une composante transversale; quand leur rapport n'est pas trop grand, les ions seront réfléchis en grand nombre aux extrémités du tube comme par des miroirs. Si le rapport est petit pour un groupe de particules, elles seront aisément confinées par un champ à miroir peu intense; mais les collisions entre particules vont peu à peu augmenter la valeur du rapport et les ions tendront de plus en plus à s'échapper à travers les miroirs. Le calcul montre cependant qu'un plasma à haute température peut être piégé dans une telle « bouteille magnétique » assez longtemps pour que les ions aient une probabilité raisonnable de subir la fusion avant de s'échapper.

Dans les appareils du type « Pyrotron », un plasma à basse température est injecté dans une bouteille magnétique quand le champ est faible; on piège ce plasma en augmentant ensuite l'ensemble du champ et il se trouve en même temps chauffé par compression adiabatique; on peut en outre envisager d'augmenter encore la densité et la température du plasma en rapprochant les miroirs.

Des appareils expérimentaux dits « Table-Top » et « Toy-Top » ont été construits sur ce principe. Une intéressante amélioration a consisté à effectuer la compression adiabatique en plusieurs étages : une bouffée de plasma est injectée dans une première chambre, piégée et comprimée, puis transférée dans une deuxième chambre plus petite, de nouveau piégée et comprimée, ... Dans la dernière chambre, le plasma est confiné par de puissants champs de miroirs et encore comprimé. Le champ est créé plus économiquement et le

de vérifier que le confinement était effectivement meilleur qu'avec un simple champ axial. Mais on constata par la suite qu'au-dessus d'une certaine valeur du courant de chauffage la décharge devient turbulente et le confinement cesse rapidement. Des calculs théoriques ont conduit à la conception d'un nouveau type de Stellarator, non plus en huit, mais en forme de champ de course, sur lequel sont bobinés des enroulements hélicoïdaux convenablement disposés.

Un petit appareil expérimental a été réalisé et un gros appareil de recherches est actuellement en cours de construction. Il doit servir de maquette pour un Stellarator

CONFINEMENT PAR MIROIRS MAGNÉTIQUES		Diamètre (cm)	Dist. entre miroirs	Millions de degrés
Compression adiabatique	Table-Top (Livermore, U.S.A.)	15	30	
	Toy-Top 3 étages (Livermore, U.S.A.)	45 à 7,5		30 (2 ét.)
	D E C A (Fontenay, France)	15	43	en constr.
Injection de particules de haute énergie	D C X (Oak-Ridge, U.S.A.)	45	90	
	Ogra (U.R.S.S.)	140	1 200	
	Fontenay (France)	30	40	en constr.
	Alice (Livermore, U.S.A.)			
Chauffage par ondes de choc	Naval Res. Lab. (Washington, U.S.A.)	25	30	20
	Scylla (Los Alamos, U.S.A.)	5	10	10
	Fontenay (France)	30 (sphère)		

facteur de compression est beaucoup plus élevé. La machine « Toy-Top » à trois étages a fonctionné déjà de façon satisfaisante; on envisage pour l'avenir un fonctionnement continu plutôt que pulsé.

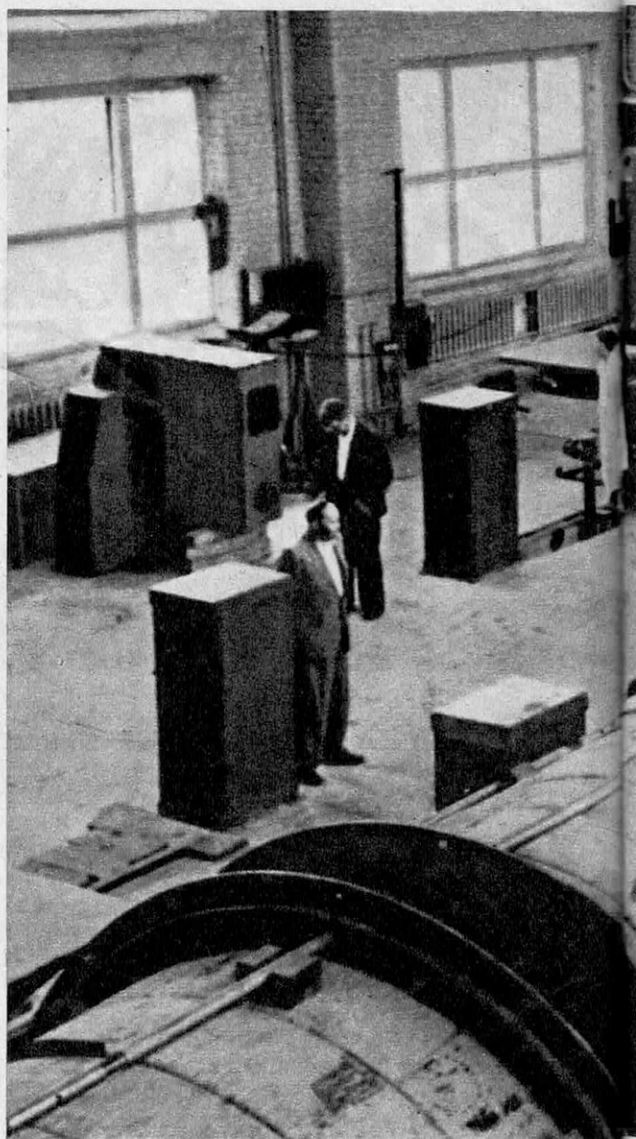
Dans des appareils d'un autre type, des ions deutérium possédant des énergies cinétiques correspondant déjà à des températures thermonucléaires sont injectés par un accélérateur dans une bouteille magnétique à champ très intense, capable, après dissociation par un arc, de piéger et de retenir les ions deutérium formés jusqu'à ce que la densité du plasma atteigne une valeur suffisante pour que les réactions de fusion aient des chances raisonnables de se produire. Tel est le principe du DCX (Direct Current Experiment) où des ions de deutérium ont été piégés pendant plusieurs millisecondes. Un appareil plus grand, Orion, destiné à fonctionner en continu, est en projet.

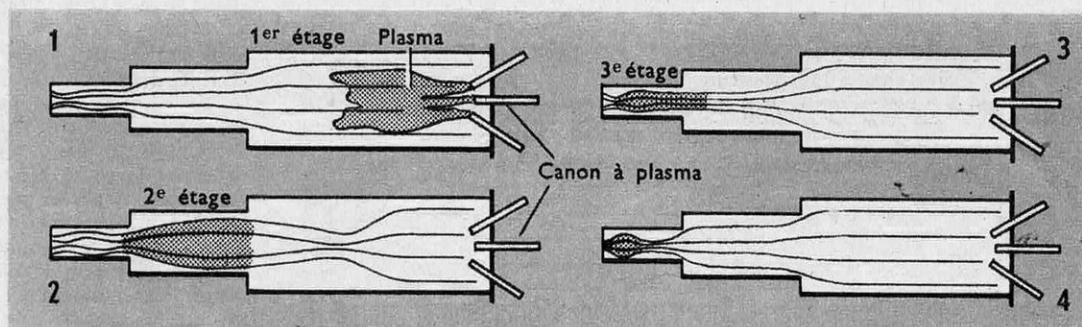
Un certain nombre de voies nouvelles vers la réalisation de la fusion nucléaire sont actuellement à l'étude. Il faut citer les essais de confinement par plasmas rotatifs (appareils « Homopolaire » et « Ixion ») ou injection d'électrons de grande énergie (appareil « Astron »).

Le chauffage par onde de choc a déjà conduit à des résultats particulièrement encourageants : dans la machine « Scylla », une décharge de courant très brutale est produite

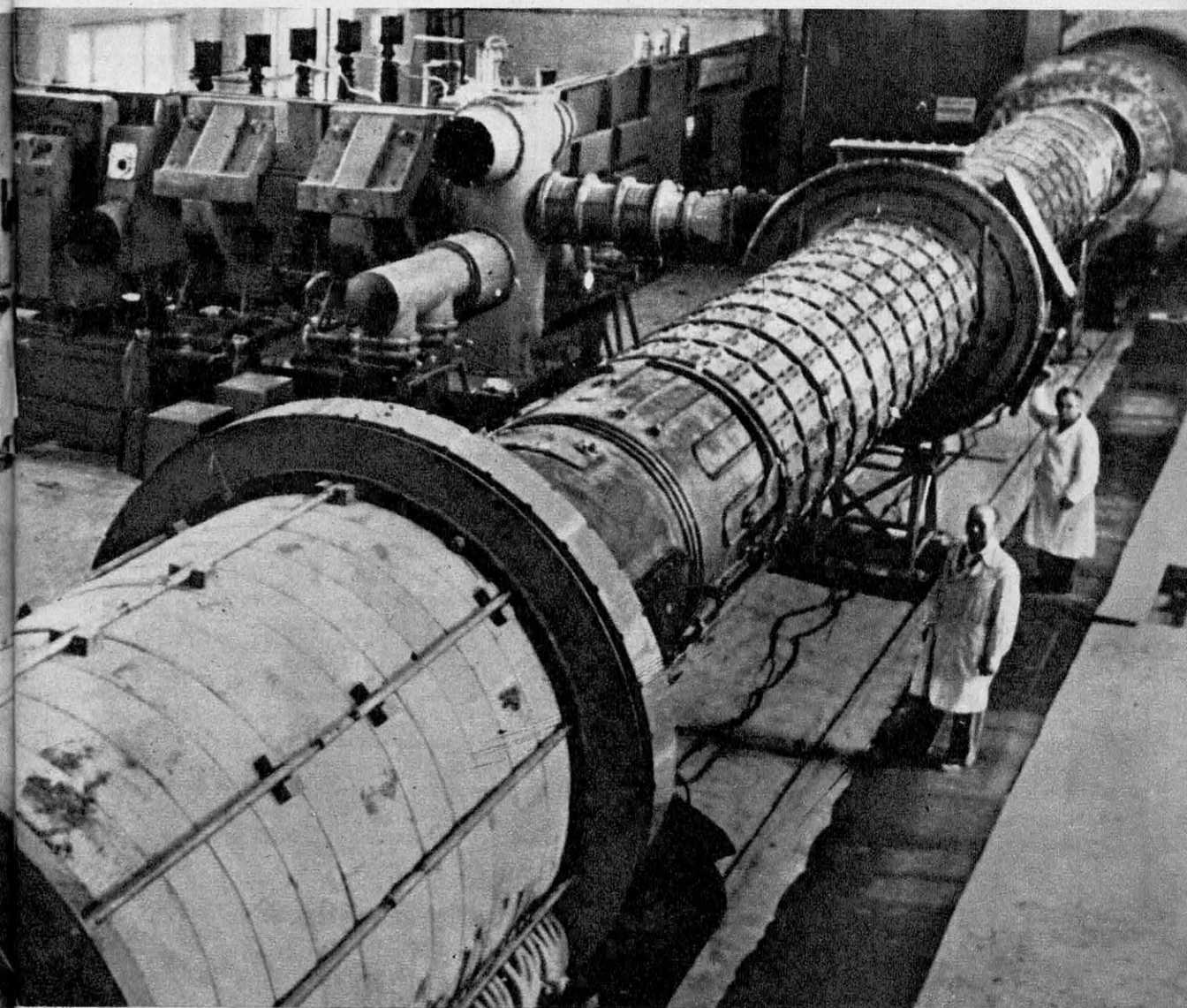
L'appareil russe « Ogra » →

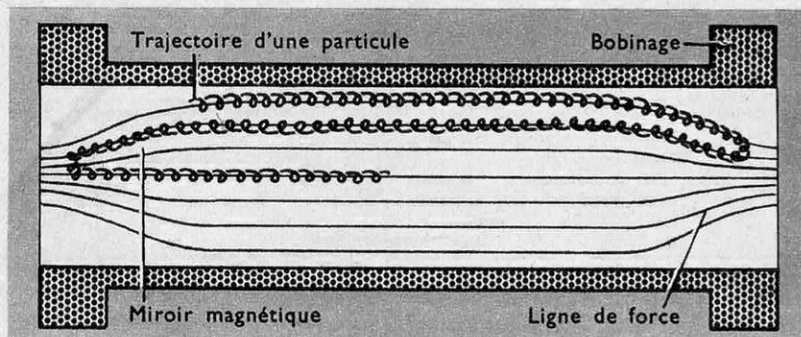
Cette « bouteille magnétique » mesure 20 m de long et 1,40 m de diamètre. Les bobines des « miroirs » se trouvent aux deux extrémités. Au centre et à gauche, on voit l'accélérateur de particules qui injecte dans l'appareil des ions de grande énergie.





LA COMPRESSION ADIABATIQUE du plasma dans des chambres successives de diamètre décroissant est ici représentée schématiquement. En 1, le plasma est émis et confiné par des miroirs dans la première chambre. En 2, il est transféré, piégé et comprimé dans la seconde, puis passe en 3 dans la troisième chambre. Dans cette dernière, en 4, il subit un nouveau piégeage en même temps que la compression finale.





LES MIROIRS MAGNÉTIQUES créés par le renforcement du champ magnétique aux extrémités du tube où les lignes de force se trouvent ainsi resserrées empêchent les ions de s'en échapper en trop grand nombre. Une proportion relativement forte d'entre eux se trouve renvoyée comme s'il y avait réflexion sur des miroirs.

dans une plaque conductrice entourant un tube rempli de gaz ionisé : un feuillet de courant est induit dans le plasma et se contracte très rapidement vers l'axe du tube, produisant une onde de choc qui chauffe le plasma. Celui-ci, piégé dans une bouteille magnétique, est ensuite soumis à une puissante compression adiabatique.

Fusion à froid

Ce procédé, très différent de ceux dont il a été question jusqu'ici, consiste, non plus à donner aux particules une énergie cinétique suffisante pour leur permettre de vaincre la répulsion de la barrière de potentiel, mais à réduire considérablement la hauteur de la barrière elle-même.

Les mésons mu (μ), particules rares produites par les grands accélérateurs, peuvent de temps en temps, en traversant de l'hydrogène liquide, remplacer l'électron planétaire d'un atome d'hydrogène : il se forme ce que l'on appelle un « atome mésique ». Le méson étant beaucoup plus lourd que l'électron, son orbite est très proche du noyau et la barrière de potentiel très réduite. Un atome mésique peut s'approcher assez près d'un atome de deutérium pour qu'il y ait fusion. L'énergie dégagée libère alors le méson μ qui est disponible pour de nouvelles fusions.

Malheureusement, les mésons μ coûtent très cher à produire et ont une vie brève : environ un millionième de seconde. Ils ne peuvent donc assurer chacun au maximum que quelques fusions. Il est à craindre que cette méthode, d'un intérêt théorique indiscutable, ne puisse jamais devenir rentable, à moins que

l'on ne découvre une particule facile à produire et à vie longue, capable de remplacer le méson μ .

Les recherches à l'Étranger et en France

La plupart des appareils que nous avons cités ont été réalisés aux États-Unis. Il ne faudrait pas en conclure que ce pays a l'exclusivité des recherches en matière de fusion. C'est simplement que le projet Sherwood, très important, a donné lieu à des publications et mises au point nombreuses et détaillées ; il est donc facile de connaître les caractéristiques des appareils et les lignes générales des recherches aux U.S.A.

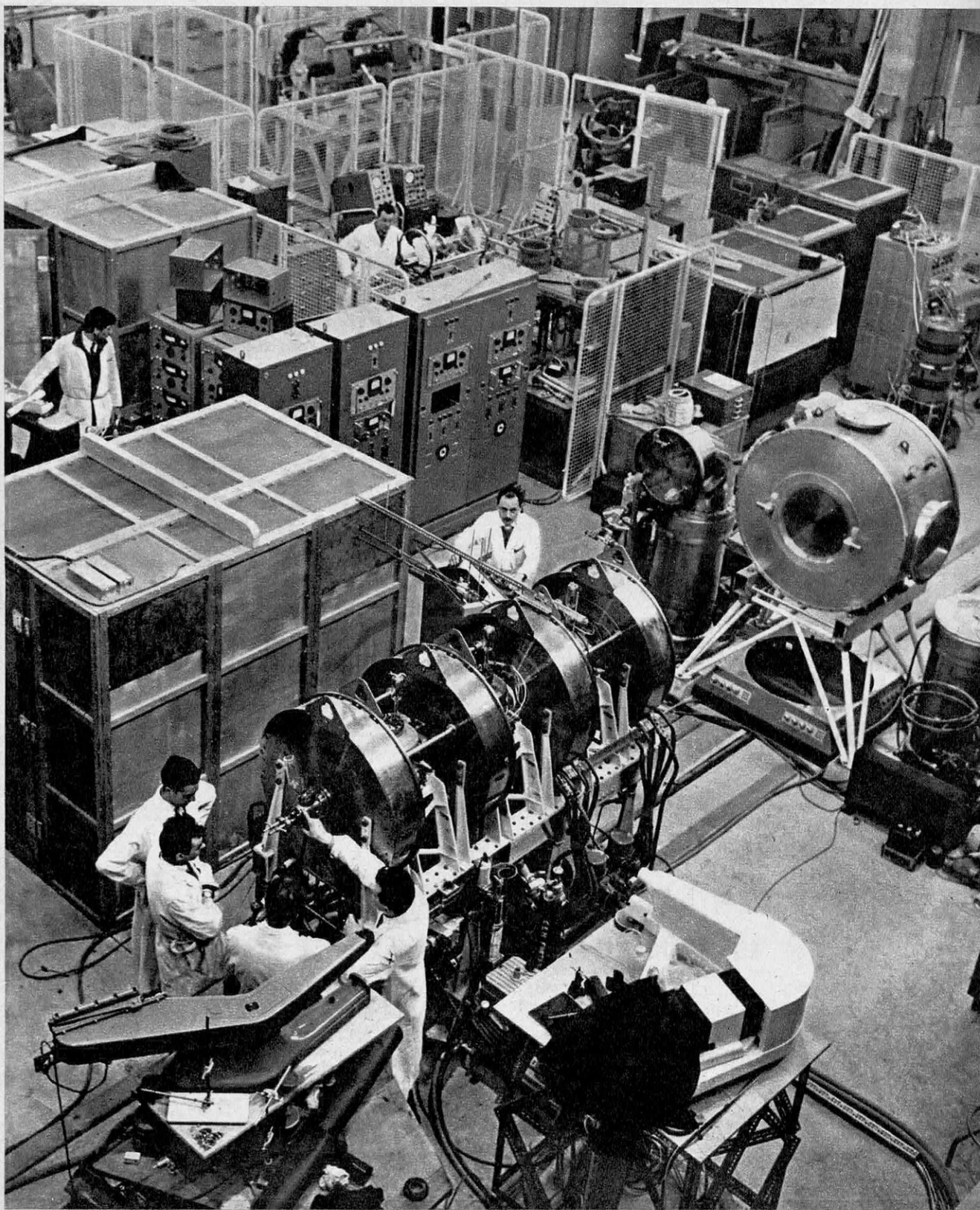
En fait, presque tous les grands pays industriellement développés : U.R.S.S., Grande-Bretagne, France, Allemagne, Suède... poursuivent actuellement, avec des moyens plus ou moins importants, des recherches sur la fusion contrôlée.

Ce sont les savants soviétiques qui les premiers, en 1956, ont annoncé qu'ils travaillaient sur la fusion et qu'ils avaient atteint des températures supérieures à un million de degrés. Les recherches en Union Soviétique sont certainement très avancées, mais jusqu'à présent peu de publications paraissaient ; depuis quelques mois, des savants étrangers ont été admis dans les laboratoires soviétiques et ont pu voir les appareils. Un accord vient même d'être conclu concernant des échanges de chercheurs entre la France et l'U.R.S.S.

En France, des recherches ont été effectuées jusqu'en 1959 sur les décharges droites et toriques au Centre d'Études Nucléaires de Fontenay-aux-Roses (C.E.N.F.A.R.). En 1959

Miroirs magnétiques à Fontenay-aux-Roses

Des ions moléculaires d'énergie moyenne seront injectés, puis confinés dans cet appareil à miroirs magnétiques qui est actuellement en construction au laboratoire du Centre d'Études Nucléaires de Fontenay-aux-Roses. La source de forme annulaire doit permettre d'obtenir un courant d'ions de l'ordre de 0,5 ampère. ➔



un contrat d'association Euratom-CEA a permis d'élargir le programme. Il porte principalement sur l'étude théorique et expérimentale des propriétés physiques des plasmas. La réalisation d'un réacteur thermonucléaire industriel n'est envisagée que comme la conséquence logique, plus ou moins lointaine, de ces recherches.

Tout en poursuivant les travaux sur les décharges linéaires et toriques, on étudie principalement à Fontenay-aux-Roses le comportement du plasma dans différentes configurations magnétiques et on réalise actuellement plusieurs appareils expérimentaux à miroirs magnétiques. Un effort important porte également sur la réalisation de sources d'ions et de canons à plasma.

Le groupe comporte actuellement une soixantaine de physiciens et d'ingénieurs et un nombre équivalent de techniciens.

Vers le milliard de degrés

Dans la plupart des machines décrites, la température a dépassé un million de degrés; une version modifiée à deux étages de Toy-Top a même permis d'atteindre 30 millions de degrés. Des émissions de neutrons ont été observées, mais dans la plupart des cas, il a été démontré qu'ils provenaient de l'accélération de noyaux de deutérium par les champs électriques élevés régnant dans les régions d'instabilités. Finalement, malgré les efforts considérables faits par de nombreux pays et bien que certaines machines, Scylla en particulier, semblent avoir produit des neutrons « nobles » c'est-à-dire provenant de fusions, on ne peut affirmer avec certitude que des

réactions thermonucléaires ont été obtenues.

Il ne faut pas oublier que, même s'il était prouvé que des réactions de fusion sont provoquées dans certains appareils, on serait encore loin de la production industrielle d'énergie. Là où il faudrait un milliard de degrés pendant plusieurs secondes, on n'a obtenu que des dizaines de millions de degrés et des temps de confinement se chiffrant en milli-secondes dans les cas les plus favorables.

Les recherches seront certainement encore longues avant que l'on soit capable de réaliser un réacteur producteur d'énergie et il faudra attendre plus longtemps encore pour que cette énergie soit produite de façon rentable. Il est cependant encourageant qu'aucun obstacle majeur ne soit apparu jusqu'ici.

On assiste depuis quelque temps à une évolution très nette. La course aux grandes machines, que l'on avait espéré transformer dans un avenir très proche en centrales thermonucléaires productrices industrielles d'énergies s'est beaucoup ralentie: il est de plus en plus admis que seule une connaissance théorique et expérimentale approfondie de la physique des plasmas permettra d'abord de réaliser un appareil thermonucléaire vraiment viable, ensuite de transformer directement l'énergie produite en électricité, ce qui supprimerait le stade thermique et augmenterait considérablement le rendement et l'intérêt du réacteur à fusion.

De nombreux laboratoires de recherches sont actuellement au travail: attendons les résultats qui ne manqueront pas d'en sortir.

Michel VERGNES
Docteur ès Sciences

UNE VÉRITABLE ENCYCLOPÉDIE PERMANENTE LES NUMÉROS HORS-SÉRIE SCIENCE ET VIE

sont publiés chaque trimestre

NUMÉROS DISPONIBLES :

- | | | |
|-------------------------|------------------------|----------------|
| ● L'AUTOMOBILE 1958/59 | ● L'AGRICULTURE | ● LE SAHARA |
| ● L'AUTOMOBILE 1959/60 | ● LES ARTS MÉNAGERS | ● LA VITESSE |
| ● L'AUTOMOBILE 1960/61 | ● MÉDECINE - CHIRURGIE | ● LA MER |
| ● L'HOMME DANS L'ESPACE | ● AVIATION 59 | ● L'HABITATION |
| ● LES CHEMINS DE FER | ● AVIATION 61 | ● ÉLECTRONIQUE |

ENVOI FRANCO SUR DEMANDE A SCIENCE ET VIE, 5, rue de la Baume, Paris 8^e
Joindre 3 NF par numéro commandé - c.c.p. Paris 9107

Je n'ai qu'un regret

c'est de n'avoir pas connu plus tôt l'École Universelle !

écrivent des centaines d'élèves enthousiastes, rendant ainsi hommage au prestigieux **ENSEIGNEMENT PAR CORRESPONDANCE** de la plus importante école du monde, qui permet de faire chez soi, à tout âge, brillamment, à peu de frais, les études les plus variées, d'obtenir en un temps record tous diplômes ou situations.

Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse :

- Br. 52.030 : **Les premières classes : 1^{er} degré, 1^{er} cycle** : Cours préparatoire (classe de 11^e), Cours élémentaire (classes de 10^e et 9^e), Cours moyen (classes de 8^e, 7^e). Admission en 6^e.
- Br. 52.035 : **Toutes les classes, tous les examens, 1^{er} degré, 2^e cycle** : classe de fin d'études, Cours complém., C.E.P., Brevets, C.A.P.; — **2^e degré** : de la 6^e aux classes de Lettres sup. et de math. spéc., Bacc., B.E.P.C., E.N., Bourses; — **Classes des collèges techniques**, Brevet d'enseignement industriel et commercial, Bacc. technique.
- Br. 52.032 : **Les études de Droit** : Capacité, Licence, Carrières juridiques (Magistrature, Barreau, etc.).
- Br. 52.044 : **Les études supérieures de Sciences** : P.C.B. (M.G.P., M.P.C., S.P.C.N., etc.), Certificats d'études sup., C.A.P.E.S. et Agrégation de Math.
- Br. 52.053 : **Les études supérieures de Lettres** : Propédeut., Licence, C.A.P.E.S., Agrégation.
- Br. 52.057 : **Grandes Ecoles et Ecoles spéciales** : Polytechnique, Ecoles Normales Supérieures, Chartes, Ecoles d'Ingénieurs; **militaires** (Terre, Mer, Air); d'**Agriculture** (France et Républiques africaines); **de Commerce**; **Beaux-Arts**; **Administration** (Ecoles professionnelles, Ecoles spéciales d'Assistants sociaux, Infirmières, Sages-Femmes).
- Br. 52.034 : **Carrières de l'Agriculture** (Régisseur, Directeur d'Exploitation, Chef de culture, Assistant, Aviculteur, Apiculteur, Contrôle laitier, Conseiller agricole, etc.), **des Industries agricoles** (Laiterie, Sucrierie, Meunerie, etc.), **du Génie rural** (Entrepreneur, Conducteur, Chef de chantier, Radiesthésiste), **de la Topographie** (Géomètre expert).
- Br. 52.045 : **Carrières de l'Industrie et des Travaux publics** : Electricité, Electronique, Physique nucléaire, Mécanique, Automobile, Aviation, Métallurgie, Mines, Prospection pétrolière, Travaux publics, Architecture, Métier, Béton armé, Chauffage, Froid, Chimie, Dessin industriel, etc.; préparations aux C.A.P., B.P., Brevet de Technicien (Bâtiment, Tr. Publics, Chimie), préparations aux fonctions d'ouvrier spécialisé, agent de maîtrise, contre-maître, dessinateur, sous-ingénieur; Cours d'initiation et de perfectionnement toutes matières.
- Br. 52.033 : **Carrières de la Comptabilité** : Caissier, Chef Magasinier, Aide-Comptable, Comptable, etc., Préparation au C.A.P. d'Aide-Comptable, au B.P. de Comptable, au diplôme d'Expert-Comptable.
- Br. 52.046 : **Carrières du Commerce** : Employé de bureau, Sténodactylo, Employé de banque, Publicitaire, Secrétaire, Secrétaire de Direction, etc.; préparations aux C.A.P. et B.P.; **Publicité, Banque, Bourse, Assurances, Hôtellerie**.
- Br. 52.037 : **Pour devenir fonctionnaire** : Toutes les fonctions publiques; Ecole nationale d'Administration.
- Br. 52.047 : **Tous les emplois réservés**.
- Br. 52.040 : **Orthographe, Rédaction, Versification, Calcul, Dessin, Ecriture**.
- Br. 52.049 : **Calcul extra-rapide** et calcul mental.
- Br. 52.036 : **Carrières de la Marine Marchande** : Ecole nat. de la Mar. march., Elève-Officier au long cours; Elève-chef de quart; Capitaine de la Marine Marchande; Capitaine et Patron de pêche; Officier Mécanicien de 2^e ou 3^e classe; Certificats internationaux de Radio de 1^{er} ou de 2^e classe (P. et T.).
- Br. 52.054 : **Carrières de la Marine de Guerre** : Ecole Navale; Ecole des Elèves officiers; Ecole des Elèves ingénieurs mécaniciens; Ecoles de Service de Santé; Commissariat et Administration; Ecoles de Maistrance; Ecole d'Apprentis marins; Ecoles de Pupilles; Ecoles techniques de la Marine; Ecole d'application du Génie maritime.
- Br. 52.048 : **Carrières de l'Aviation** : Ecoles et carrières militaires: Ec. de l'Air, Ec. milit. de sous-offic. élèves-offic.; Personnel navigant; Mécaniciens et Télémécaniciens; — Aéronautique civile; — Carrières administratives; — Industrie aéronautique; — Hôtesse de l'Air.
- Br. 52.031 : **Radio** : Certificats internationaux; Construction; dépannage de poste. — **Télévision**.
- Br. 52.056 : **Langues vivantes** : Anglais, Allemand, Russe, Espagnol, Italien, Arabe. — **Tourisme**.
- Br. 52.038 : **Etudes musicales** : Solfège, Harmonie, Composition, Direction d'orchestre; Piano, Violon, Flûte, Clarinette, Guitare, Accordéon, Instruments de Jazz; Chant; Professorats publics et privés.
- Br. 52.050 : **Arts et Dessins** : Dessin pratique, Cours universel de Dessin; Anatomie artistique; Illustration; Figurine de mode, Composition décorative; Aquarelle, Gravure, Peinture, Pastel, Fusain; Professorats.
- Br. 52.055 : **Carrières de la Couture et de la Mode** : Coupe, Couture (Flou et Tailleur), Lingerie, Corset, Broderie, préparations aux C.A.P., B.P., Professorats officiels; préparations aux fonctions de Petite main, Seconde main, Première main, Vendeuse-Retoucheuse, Modiste, Coupeur hommes, Chemisier, etc.; Cours d'initiation et perfectionnement toutes spécialités. — **Enseignement ménager** : Monitorat et Professorat.
- Br. 52.041 : **Secrétariats** (Secrétaire de direction, Secrétaire particulier, Secrétaire de médecin, d'avocat, d'homme de lettres, Secrétaire technique); **Journalisme** : l'Art d'écrire (Rédaction littéraire) et l'Art de parler en public (Eloquence usuelle).
- Br. 52.051 : **Cinéma** : Technique générale, Décoration, Prise de vues, Prise de son. — **Photographie**.
- Br. 52.039 : **Coiffure et Soins de beauté**.
- Br. 52.058 : **Toutes les Carrières féminines**.

La liste ci-dessus ne comprend qu'une partie de nos enseignements. N'hésitez pas à nous écrire. Nous vous donnerons gratuitement tous les renseignements et conseils qu'il vous plaira de nous demander.

DES MILLIERS D'INÉGALABLES SUCCÈS

remportés chaque année par nos élèves dans les examens et concours officiels prouvant l'efficacité de l'enseignement par correspondance de

L'ÉCOLE UNIVERSELLE, 59, boulevard Exelmans - PARIS (XVI^e)

14, Chemin de Fabron, NICE (A.-M.) 11, place Jules-Ferry, LYON



**JEUNES GENS
JEUNES FILLES**

UN AVENIR

SPLENDIDE

VOUS SOURIT

**E
G
C**

mais pour RÉUSSIR

il vous faut un DIPLOME D'ÉTAT

ou un titre de formation professionnelle équivalent

PAR CORRESPONDANCE :

L'ÉCOLE DU GÉNIE CIVIL ET DES SCIENCES MATHÉMATIQUES

forte de 50 années d'expérience et de succès, vous préparera
à tous les examens, concours ou formations de votre choix.

MATHS ET SCIENCES : Cours de Mathématiques, Sciences et Techniques à tous les degrés : du débutant en Mathématiques, Sciences et Techniques jusqu'aux Math. Sup. — Cours d'appui pour toutes les classes de Lycées, Collèges Techniques et Bacs. Préparation à l'entrée au C.N.A.M. et à toutes les écoles techniques et commerciales et aux écoles civiles et militaires.

MINISTÈRE DU TRAVAIL : F.P.A. Concours d'admission dans les Centres de formation professionnelle pour adultes des deux sexes (18 à 45 ans). Spécialités : Electronique — Radiotechnique — Dessinateurs en Mécanique : de 21 à 35 ans, Conducteurs et dessinateurs en Bâtiment — Opérateurs géomètres, Électricité, Machines Frigorifiques, Secrétariat, etc. — Diplôme d'État d'Adjoint technique ou équivalent après dix mois de stage. Élèves payés durant le stage. Placement et avancement rapides AT2, AT3 et facilités pour accès au titre d'ingénieur qualifié (Les concours de commis et conducteurs de travaux sont réservés aux candidats du sexe masculin).

ENSEIGNEMENT TECHNIQUE : Préparation aux C.A.P., Brevets Professionnels, B.E.I. et Brevets de Techniciens pour tous les examens de l'Industrie, du Bâtiment, du Commerce (Secrétariat, Comptabilité) et des Techniques Agricoles. Cours spécial de Technicien en énergie nucléaire.

DESSIN INDUSTRIEL : A tous les degrés, cours pour toutes les Techniques (Mécanique, Électricité, Bâtiment, etc.).

CHIMIE ET PHYSIQUE : Préparation intégrale au Brevet d'Enseignement Industriel (B.E.I.), examens probatoires et examens définitifs d'Aide Chimiste et d'Aide Physicien ainsi qu'aux Brevets de Techniciens Chimiste ou Physicien (Ministère de l'Éducation Nationale).

ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE : Formation de Cadres - Cours d'appoint pour Techniciens des diverses industries. **MÉTRÉ :** Préparation aux divers C.A.P. et à la formation professionnelle T.C.E. et de Métreurs-vérificateurs.

TOPOGRAPHIE : Préparation au C.A.P. d'opérateur géomètre et à l'examen de Géomètre Expert D.P.L.G.

ADMINISTRATIONS : Tous les concours : Ponts et Chaussées — Mines — Génie Rural — P.T.T. — S.N.C.F. — Cadastre — Service N.I. Géographique — Service topographique (A.F.) — Météo — R.T.F. Algérie — F.O.M. — Défense Nationale, Ville de Paris, E.D.F. et Gaz de France, Eaux et Forêts, Police, etc.

MARINE ET AVIATION MILITAIRES : Préparation aux armes techniques, écoles de sous-officiers et officiers.

AVIATION CIVILE : Préparation aux Brevets de Pilotes professionnels et I.F.R. et à celui de Pilote de Ligne d'Air France — Mécaniciens navigants - Agents qualifiés d'Air France — Techniciens et Ingénieurs de la Navigation aérienne.

AÉRONAUTIQUE : Préparation aux Écoles Techniques et formation des Cadres.

MARINE MARCHANDE : Brevets d'Élèves et Officiers Mécaniciens de 1^{re}, 2^e et 3^e classe. Motoristes à la Pêche — Préparation au diplôme d'Élève Chef de quart et au Cabotage — Entrée dans les Écoles Nationales de la Marine Marchande (Pont — Machines — T.S.F.). Brevet d'Officier radio.

MINISTÈRE DES P.T.T. : Préparation aux certificats spéciaux, 2^e et 1^{re} classe de Radio-Télégraphiste.

PROMOTION DU TRAVAIL : Cours faits avec l'esprit de ceux du C.N.A.M. et des P.S.T. de province.

Cours de formation professionnelle pour tous les Cadres dans toutes les branches : Contremaître, Dessinateur, Conducteur, Technicien, Sous-Ingénieur et Ingénieur qualifié. Préparation au titre d'ingénieur diplômé par l'État, ainsi qu'aux Écoles d'Ingénieur ouvertes aux candidats de formation professionnelle. Préparation à l'École d'Électronique de Cligny.

Programmes pour chaque Section et Renseignements, contre deux timbres pour envoi.

ÉCOLE DU GÉNIE CIVIL

152, avenue de Wagram — PARIS (XVII^e) — Tél. : WAG 27-97.