

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - http://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Notice de la Revue	
Auteur(s) ou collectivité(s)	La science et la vie
Auteur(s)	[s.n.]
Titre	La science et la vie
Adresse	Paris : La science et la vie, 1913-1945
Collation	339 vol. : ill. ; 24 cm
Cote	SCI.VIE
Sujet(s)	Sciences -- Vulgarisation Culture scientifique et technique Presse scientifique
Note	À partir de février 1943, le titre devient "Science et Vie". La bibliothèque du Cnam ne possède pas de collection, la numérisation a été faite grâce au prêt de la collection privée de M. Pierre Cubaud.

Notice du Volume	
Auteur(s) volume	[s.n.]
Titre	La science et la vie
Volume	Tome 65. n. 318. Février 144
Adresse	Paris : La Science et la Vie, 1944
Collation	1 vol. (IV p.-p.[45]-88) : ill., couv. ill., en coul. ; 24 cm
Cote	SCI. VIE 318
Sujet(s)	Sciences -- Vulgarisation Culture scientifique et technique Presse scientifique
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	10/12/2019
Date de génération du PDF	05/12/2019
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?SCVIE.318

FÉVRIER 1944

N° 318

SCIENCE ET VIE



10 FRANCS

L'ÉLECTRICITÉ s'apprend aussi...



...par **CORRESPONDANCE**

ECOLE CENTRALE DE T.S.F.
12 rue de la Lune - Paris

25^e année de
fonctionnement
et d'expériences

25.000 élèves
instruits et placés

Demandez à notre annexe : 8, rue Porte-de-France, à VICHY, le
« Guide des carrières de la Radio » qui vous sera adressé
gracieusement.

PUBLICITÉS RÉUNIES

Le professeur de **DESSIN ...** **Chez Vous !**

grâce à Marc SAUREL créateur de la célèbre Ecole de Dessin
par correspondance

"LE DESSIN FACILE"

Ne dites plus : je suis trop éloigné, trop occupé, trop âgé
pour apprendre le dessin !

Pour peu que vous en ayez le goût, Marc SAUREL vous initiera
à cet art en quelques mois. Sa nouvelle méthode "LE DESSIN
FACILE", se base sur une expérience de plus de 32 ans. Elle se caractérise par un enseignement
absolument personnel pour chaque élève, dont les débuts sont grandement facilités par l'utili-
sation de magnifiques planches modèles, documents photographiques inédits offerts avec le Cours.

Les résultats de son enseignement, Marc SAUREL ne se contente pas de les affirmer : il les
montre ! Par deux fois en un an, il a présenté au public à la Galerie
Royale — au cœur de Paris — plus de 900 œuvres de ses élèves.



Croquis d'après nature
par un de nos élèves,

BON pour une documentation illustrée SV 43
qui vous sera envoyée contre 3 frs en
timbres-poste. Soulignez le genre de dessin qui
vous intéresse

Croquis	Dessin de Mode	Dessin Industriel
Paysage	Dessin de Publicité	Dessin Animé
Portrait	Dessin d'Illustration	Dessin de Lettres
Cours de dessin pour les enfants de 6 à 12 ans		

"LE DESSIN FACILE" 11, Rue Keppler
PARIS (16^e)

Plusieurs milliers de
visiteurs ont été
ainsi à même de ju-
ger par leurs prop-
res yeux de la
remarquable effica-
cité du DESSIN
FACILE.

MÉTIER D'AVENIR

● Parmi les carrières ou-
vertes aux dessinateurs, il
en est une qui assure de
nombreux postes :
LE DESSIN INDUSTRIEL.
Un cours spécialement
conçu pour l'accession à
cette carrière permet aux
élèves d'obtenir rapide-
ment les connaissances
techniques et l'habileté
manuelle requise.

*Comme au bon vieux temps
du roi
Henri...*



*...l'antique
distillerie charentaise
distille les meilleurs
crus de Cognac pour:*

Le "Verrre" Galant

CAMUS
LA GRANDE MARQUE
COGNAC

"L'Électricité c'est l'avenir des jeunes"



Étudiez chez vous, sans interrompre
vos occupations, la plus jeune et
la plus passionnante des sciences

L'ÉLECTRICITÉ ET SES APPLICATIONS

En 6 mois, grâce à
notre méthode moderne
d'enseignement pratique
professionnel, vous de-
viendrez l'expert recher-
ché dans l'Industrie, le
Cinéma, la Télévision,
l'Amplification, etc

INSTITUT ELECTRO-RADIO

6, RUE DE TÉHÉRAN-PARIS-8^e

DE SUITE, écrivez-nous pour recevoir • Service V S
gratuitement notre luxueux programme.
"L'ÉLECTRICITÉ ET SES APPLICATIONS MODERNES"
PRÉPARATION AUX DIPLOMES D'ÉTAT

Les cours par correspondance de L'ÉCOLE UNIVERSELLE

permettent à ses élèves d'effectuer le maximum
de progrès dans le minimum de temps. Ceux
de ces cours qui préparent aux examens et aux
concours publics conduisent chaque année au
succès plusieurs milliers d'élèves.

Vous pouvez faire CHEZ VOUS, QUELLE
QUE SOIT VOTRE RÉSIDENCE, sans dépla-
cement, sans abandonner l'emploi qui vous fait
vivre, en utilisant simplement vos heures de
loisirs, avec le MINIMUM DE DÉPENSES,
quel que soit votre âge, en toute discrétion si
vous le désirez, toutes les études que vous
jugerez utiles pour compléter votre culture,
pour obtenir un diplôme universitaire, pour
vous faire une situation dans un ordre quel-
conque d'activité, pour améliorer la situation
que vous pouvez déjà occuper ou pour changer
totalement d'orientation.

L'Ecole Universelle vous adressera gratuite-
ment, par retour du courrier, celle de ses bro-
chures qui vous intéresse et tous renseignements
qu'il vous plaira de lui demander.

**BROCHURE N° L. 14.097. — ENSEIGNE-
MENT PRIMAIRE :** Classes complètes
depuis le cours élémentaire jusqu'au Brevet
supérieur, Bourses, Brevets, etc.

**BROCHURE N° L. 14.098. — ENSEIGNE-
MENT SECONDAIRE :** Classes complètes
depuis la onzième jusqu'à la classe de ma-
thématiques spéciales incluse, Certificat
d'études classiques ou modernes, Baccalau-
réats, etc.

**BROCHURE N° L. 14.099. — ENSEIGNE-
MENT SUPÉRIEUR :** Licences (Lettres,
Sciences, Droit), Professorats, Examens
professionnels, etc.

**BROCHURE N° L. 14.100. — GRANDES
ÉCOLES SPÉCIALES.**

**BROCHURE N° L. 14.101. — CARRIÈRES
DE L'INDUSTRIE, des MINES et des
TRAVAUX PUBLICS.**

**BROCHURE N° L. 14.102. — CARRIÈRES
DE L'AGRICULTURE et du Génie rural.**

**BROCHURE N° L. 14.103. — CARRIÈRES
DU COMMERCE, de l'INDUSTRIE HO-
TELIÈRE, des ASSURANCES, de la
BANQUE, de la BOURSE, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.104. — ORTHOGRA-
PHE, RÉDACTION, VERSIFICATION,
CALCUL, DESSIN, ÉCRITURE, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.105. — LANGUES
VIVANTES, TOURISME, Interprète, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.106. — AIR, MARINE :
Pont, Machine, Commissariat, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.107. — SECRÉTA-
RIATS, BIBLIOTHÈQUES, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.108. — ÉTUDES
MUSICALES : Instruments, Professorats.**

**BROCHURE N° L. 14.109. — ARTS DU
DESSIN : Professorats, Métiers d'art, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.110. — MÉTIERS DE
LA COUTURE, de la COUPE, de la MODE,
de la LINGERIE, de la BRODERIE, etc.**

**BROCHURE N° L. 14.111. — ARTS DE LA
COIFFURE ET DES SOINS DE BEAUTÉ.**

**BROCHURE N° L. 14.112. — CARRIÈRES
DU CINÉMA.**

**BROCHURE N° L. 14.113. — CARRIÈRES
ADMINISTRATIVES.**

ÉCOLE UNIVERSELLE

12, Place Jules-Ferry, LYON
59, Boulevard Exelmans, PARIS

ÉCOLE DU GÉNIE CIVIL NICE ÉCOLE DE T. S. F.

3, rue du Lycée
ENSEIGNEMENT PAR CORRESPONDANCE

MATHÉMATIQUES

Enseignement des Mathématiques, Physique, Mécanique, Chimie, Astronomie, à tous les degrés.

INDUSTRIE

CONTRÉMAÎTRE, DESSINATEUR, TECHNICIEN, SOUS-INGÉNIEUR, INGÉNIEUR en Mécanique générale, Constructions aéronautiques, Électricité, Electromécanique, Chimie industrielle, Bâtiment, Travaux publics, Constructions navales, Géomètres.

COMMERCE - DROIT

Comptable Secrétaire, et Directeur, capacité en droit, études juridiques, brevet d'expert comptable de l'Etat.

AGRICULTURE

Agriculture générale, Mécanique et Génie agricole, Sylviculture, Industries agricoles.

ADMINISTRATIONS

Tous les cours techniques des diverses administrations France et Colonies.

AVIATION CIVILE

Brevets de navigateurs aériens et de Pilotes. Concours d'Agents techniques et d'Ingénieurs adjoints, Météorologistes. Opérateurs radioélectriciens, Chefs de Poste, Radios et Mécaniciens d'aéronefs.

BACCALAURÉATS. ECOLES NATIONALES

Préparation à l'entrée à toutes les Ecoles nationales, secondaires, techniques et supérieures et aux Baccalauréats. Brevets Math.-Géné.

Ces cours ont également lieu à Paris, 152, avenue d'Wagram.

Envoi du programme désiré contre 5 francs en timbres. - (INSCRIPTIONS A TOUTE ÉPOQUE)

JEUNES GENS !

Les meilleures situations, les plus nombreuses, les plus rapides, les mieux payées, les plus attrayantes...

sont dans la RADIO

P. T. T., AVIATION, MARINE, NAVIGATION AÉRIENNE, COLONIES, DEFENSE DU TERRITOIRE, POLICE, DÉPANNAGE, CONSTRUCTION INDUSTRIELLE, TELEVISION, CINÉMA.

COURS SCIENTIFIQUES, TECHNIQUES, PRATIQUES, PAR CORRESPONDANCE

Les élèves reçoivent des devoirs qui leur sont corrigés et des cours spécialisés. Enseignement conçu d'après les méthodes les plus modernes, perfectionné depuis 1908.

Tous nos cours comportent des exercices pratiques chez soi : lecture au son, manipulation, montage et construction de poste.

Délivrance de certificats de fin d'études aux élèves des Sections Industrielles.

Préparation à l'entrée aux écoles privées d'Enseignement maritime.



Croquis d'élève à sa 3^e leçon

L'ÉCOLE A. B. C. et les enfants

Vous qui pensez à l'avenir de vos enfants, n'oubliez pas que le Dessin joue un rôle important dans la vie moderne. Offrez-leur ce qui sera pour eux une source de joie en même temps qu'une arme bien précieuse pour leur avenir; apprenez-leur à dessiner, en les inscrivant au Cours spécial que l'Ecole A. B. C. a créé pour les enfants de 8 à 14 ans.

LES FOURNITURES VOUS SONT OFFERTES

L'Ecole A. B. C. voulant vous éviter les recherches fastidieuses des fournitures difficiles à trouver, offre gracieusement à ses nouveaux élèves inscrits au comptant un matériel important leur permettant de commencer tout de suite à dessiner. Mais hâtez-vous de profiter de cette offre de fournitures dont le stock est forcément limité.

BROCHURE GRATUITE

Pour connaître le cours spécial de l'Ecole A. B. C., demandez notre plaquette du « Gribouillage au Dessin » qui vous donnera tous renseignements sur la méthode employée et le programme des cours. Joignez 5 francs en timbres pour tous frais en vous adressant au service C B 19.

L'ÉCOLE A. B. C. DE DESSIN

12, rue Lincoln, PARIS (8^e) - 6, rue Bernadotte, PAU (Basses-Pyr.)

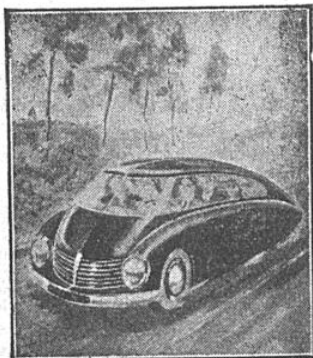
SCIENCE ET VIE

Tome LXV - N° 318

SOMMAIRE

Février 1944

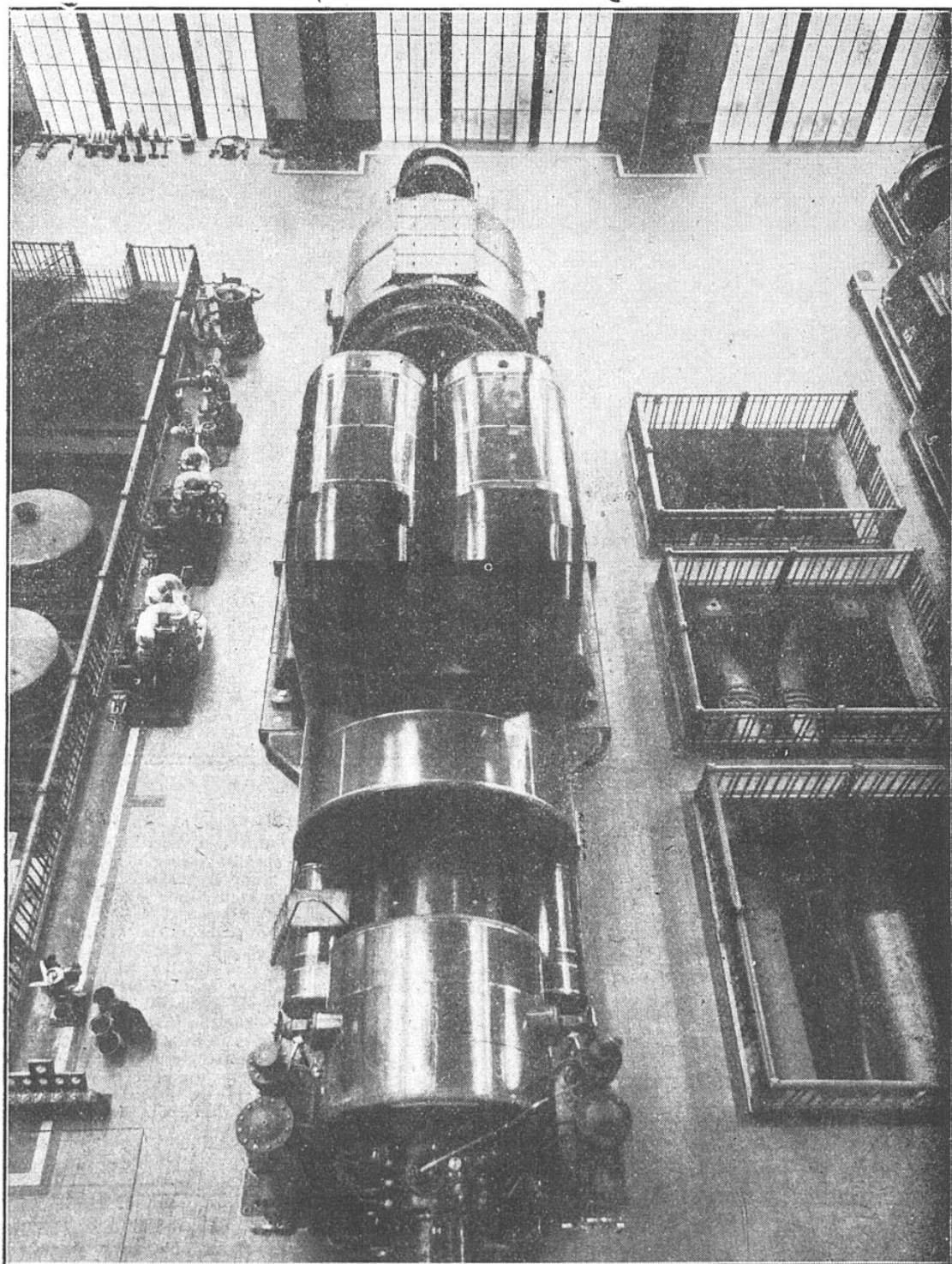
- ★ La révolution de l'énergie, par H. Parodi..... 47
- ★ Les dimensions de l'Univers, par Charles Fabry..... 60
- ★ D'où viennent les traînées nuageuses dans le sillage des avions? par Paul Lucas..... 73
- ★ Que sera l'automobile de demain? par Henri Petit.... 77
- ★ L'exploitation industrielle de la chaleur terrestre, par Georges Lafre..... 86
- ★ Les A Côté de la Science, par V. Rubor..... 87



Economie, facilité et agrément de conduite, sécurité, vitesse, telles seront, au lendemain des hostilités, les qualités exigées de la voiture automobile. La recherche du maximum de légèreté pour la carrosserie et du maximum de puissance du moteur sous un faible volume, l'application rationnelle des solutions ayant fait leurs preuves pour les changements de vitesse, l'amélioration de la suspension et du freinage constitueront donc les préoccupations dominantes du constructeur. La couverture de ce numéro montre comment pourra se présenter cette voiture de demain, équipée d'un moteur plat, de 7 à 9 ch, traction avant, roues indépendantes, carrosserie « coque » à toit ouvrant. C'est par le souci de la haute qualité de sa production automobile que la France pourra soutenir la concurrence de la fabrication étrangère de grande série (voir l'article page 77 de ce numéro).

« Science et Vie », magazine mensuel des Sciences et de leurs applications à la vie moderne. Rédaction, Administration, actuellement 3, rue d'Alsace-Lorraine, Toulouse. Chèque postal : numéro 184.05 Toulouse. Téléphone : 230-27. Publicité : 68, Rue de Rome, Marseille.

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays. Copyright by « Science et Vie », Février mil neuf cent quarante-quatre. Registré du Commerce : Toulouse 3235 B. Abonnements : France et Colonies, un an : cent dix francs.



T W 40061

UN GROUPE TURBOALTERNATEUR DE 55 000 KW DE LA CENTRALE ARRIGHI DE L'UNION D'ÉLECTRICITÉ
Cette usine est une des plus importantes usines thermiques de base de la région parisienne. Elle est équipée
de quatre groupes analogues au groupe ci-dessus tournant à 1 500 tours par minute, alimentés en vapeur
à 40 hectopièzes et 450° C de surchauffe.

LA RÉVOLUTION DE L'ÉNERGIE

par H. PARODI

Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers

L'évolution industrielle qui s'est brusquement accélérée depuis trois siècles est caractérisée par une série de « Révolutions » correspondant chacune à la création d'une nouvelle branche d'industrie. Après avoir vécu la « Révolution » du fer, la « Révolution du tissage », la « Révolution des transports », nous vivons maintenant la « Révolution de l'énergie », qui est l'aboutissement nécessaire de toutes les autres. L'énergie est, en effet, le facteur primordial de toute évolution dans notre Univers, celui qui commande toutes les transformations mécaniques, chimiques, électriques, atomiques. La grande œuvre du XX^e siècle est l'organisation sur le plan mondial de la production, de la transformation, du transport et de la distribution de l'énergie, chaque machine opératrice, chaque appareil où s'élabore une transformation physique, une réaction chimique, une transmutation atomique, devant être alimenté dans les conditions les plus économiques et les plus efficaces. C'est sous la forme électrique que l'énergie, débarrassée de tout support matériel, peut être le plus aisément transportée, accumulée et transformée. Mais la forme électrique n'est que le dernier maillon d'une chaîne complexe de transformations, grâce auxquelles les « Matières premières » de l'énergie sont mises sous des formes de plus en plus maniables, de plus en plus concentrées, où le support matériel est de moins en moins important, et finit par disparaître au stade de l'Energie électrique.

Les matières premières de l'énergie

DANS la situation d'avant-guerre, vers 1937, la consommation mondiale annuelle d'« ergogènes » — ainsi peut-on appeler les matières premières de l'énergie — s'élevait en chiffres ronds à :

1 200 millions de tonnes de charbon;

300 millions de tonnes de produits pétroliers;

200 milliards de kilowatts-heures d'énergie d'origine hydraulique;

50 milliards de mètres cubes de gaz naturels;

400 millions de tonnes de bois de chauffage.

Depuis une vingtaine d'années, la consommation mondiale de charbon a peu varié, presque tout l'accroissement de puissance de l'équipement industriel ou domestique du globe ayant été réalisé par la mise en service de moteurs thermiques utilisant des combustibles liquides, ou par aménagement de centrales hydrauliques.

Cette consommation de matières premières correspond à la production annuelle d'une quantité d'énergie utile de l'ordre de 2 000 milliards de kilowatts-heures (1), compte tenu des énormes progrès réalisés depuis trente-cinq ans dans la production thermique de l'énergie.

Tous les efforts des techniciens sont actuellement dirigés dans deux directions différentes :

1^o La recherche de sources nouvelles d'énergie;

2^o Le perfectionnement des procédés d'utilisation des matières premières disponibles.

(1) Cette évaluation grossière a été faite en admettant : a) pour l'ensemble des moteurs à explosion et à combustion un rendement moyen d'environ 30 %; b) pour l'ensemble des moteurs thermiques à vapeur et des appareils de chauffage domestiques ou industriels un rendement moyen d'environ 7 %, soit 1.7 kg de charbon par kWh utilisable.

Nous examinerons plus loin en détail le second point, quand nous parlerons de la production de l'énergie électrique, et nous nous bornerons à signaler, en ce qui concerne le premier point, que des essais ont été effectués pour utiliser l'énergie thermique des mers tropicales (1) ou glaciales (2) en construisant des groupes turbo-condenseurs fonctionnant sous des différences de température de l'ordre de 20° C. L'utilisation directe du rayonnement solaire dans les régions tropicales pourrait aussi être envisagée (3), la puissance produite par exposition au soleil de cellules photoélectriques pouvant atteindre 2 à 3 watts par mètre carré. Des usines marémotrices ont été construites en vue de déterminer le rendement hydraulique et économique de centrales à un grand nombre de groupes, fonctionnant sous des hauteurs de chute très variables (entre 3 et 13 mètres à la Fresnaye, entre 2 et 7,5 m à l'Aber Wrach). Il est fort possible que ces essais permettent la réalisation pratique de centrales utilisant de l'énergie prélevée sur les quantités énormes mises en jeu par le mouvement des astres ou par leur rayonnement. On peut dire que tout dispositif susceptible de capter ce rayonnement ou de « freiner » un mouvement astronomique quelconque constituera une source d'énergie, dont la puissance variera avec la même période que le mouvement freiné.

(1) Voir : « La captation de l'énergie thermique des mers » (*Science et Vie*, n° 163, janvier 1931).

(2) Voir : « L'usine polaire » (*Science et Vie*, n° 147, septembre 1929).

(3) Voir : « Les projets de l'exploitation de l'énergie solaire au Sahara » (*Science et Vie*, n° 308, avril 1943).

PRODUCTION MOYENNE ANNUELLE (millions de kilowatts-heures)	PUISSANCES MOYENNES ANNUELLES (kilowatts)	NOMBRE DE CENTRALES	PRODUCTION GLOBALE (millions de kilowatts-h.)	CONSOMMATION GLOBALE DE CHARBON (tonnes)	CONSOMMATION DE CHARBON SPÉCIFIQUE (g. par kWh)
Supérieure à 200	54 000	36	16 855	8 750 000	590
De 100 à 200	11 500	16	2 008	1 480 000	825
De 50 à 100	6 500	22	1 578	1 130 000	800
De 25 à 50	3 400	21	714	562 000	880
De 10 à 25	1 920	35	557	530 000	1 060
De 5 à 10	960	20	138	154 000	1 240
De 2,5 à 5	540	15	54	64 500	1 340
De 1 à 2,5	395	19	31	60 000	2 110
De 0,5 à 1	165	13	7	16 900	2 650
ENSEMBLE	11 170	214	21 942	12 747 400	665

TABLEAU I. — PUISSANCES MOYENNES ET CONSOMMATIONS DE CENTRALES A VAPEUR

Dans ce tableau, les 214 centrales à vapeur du « Central Electricity Board », en Grande-Bretagne, ont été classées par ordre de grandeur de leur production annuelle d'électricité et groupées en neuf catégories, ce qui permet de suivre la progression de la consommation spécifique quand décroît la puissance moyenne du groupe considéré.

Mais parallèlement aux efforts techniques s'exercent des efforts « économiques » et « politiques » tendant à réaliser une organisation mondiale de l'Industrie de l'Energie. Cette organisation est complexe et vivante, non seulement parce qu'il y a interpénétration et interdépendance entre l'Industrie de l'Energie et toutes les autres industries, celle des transports et des mines, en particulier, mais encore et surtout parce qu'elle exerce une action prépondérante sur les conditions générales du travail.

C'est grâce à elle que toutes les industries ont pu être transformées et que les machines opératrices ont pu être construites à l'échelle la mieux appropriée au travail à réaliser, sans être limitées comme jadis par la petitesse et la précarité du moteur humain.

Offre et demande de l'énergie

L'énergie est offerte industriellement sous forme thermique, hydraulique et électrique, et, dès maintenant, aux productions locales et individuelles

d'énergie s'ajoutent des distributions urbaines et régionales d'eau, de gaz, d'électricité et bientôt de chaleur (vapeur) ou de froid (saumure). L'énergie tend de plus en plus à être distribuée sous forme électrique en raison des facilités que comporte la « transmission » à grande distance et à faible perte des courants électriques continus ou alternatifs. Mais la distribution d'énergie par transport matériel de combustibles, solides, liquides ou gazeux, par rail, par eau, par canalisations, continue et continuera longtemps à être utilisée industriellement.

Toutes ces distributions individuelles ou collectives ont des caractères communs dont le plus important est la continuité de l'offre et la discontinuité des demandes individuelles.

Le grand avantage de l'énergie électrique est de pouvoir être produite sous la même forme par n'importe quelle source, thermique, hydraulique, éolienne, et de pouvoir être transmise à distance, alors que la « matière première » correspondante pouvait être intransportable écono-

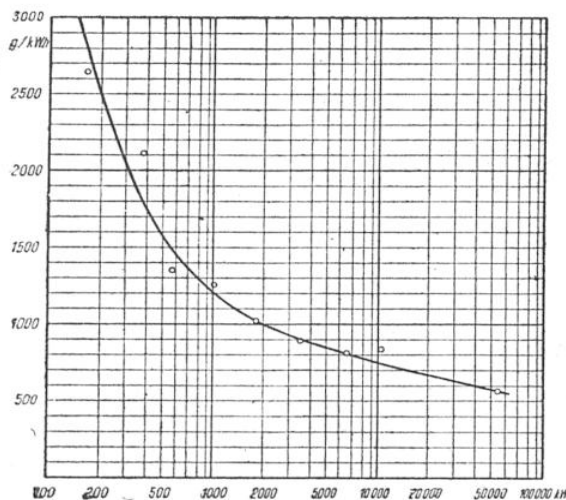


FIG. 1. — LA CONSOMMATION DE CHARBON (ÉVALUÉE EN GRAMMES PAR KILOWATT-HEURE) D'UNE CENTRALE A VAPEUR EST D'AUTANT PLUS FAIBLE QUE LA PUISSANCE MOYENNE ANNUELLE DE LA CENTRALE EST PLUS ÉLEVÉE

Sur ce graphique ont été reportés les chiffres extraits du tableau I et se rapportant aux neuf groupes de centrales considérés. On voit que pour les centrales de faible puissance, de l'ordre de 500 kW, la consommation s'élève à 1,6 kg/kWh, tandis que pour les centrales de grande puissance moyenne, de l'ordre de 100 000 kW, elle tombe au-dessous de 500 g/kWh.

miquement. Ce fait capital est particulièrement apparent dans les usines métallurgiques où des matières premières de l'énergie sont disponibles, par exemple sous forme de gaz de haut fourneau ou de four à coke, comme sous-produits de la fabrication principale. Il en est de même dans le cas des chutes d'eau ou dans celui des mines de lignite ou de charbon de mauvaise qualité. La transformation sur place de l'énergie hydraulique ou thermique en énergie électrique permet en fait l'utilisation d'énergies qui, sans elle, seraient pratiquement perdues.

Dans les centrales thermiques, on utilise des combustibles :

— Solides : charbon, lignite, tourbe, bois.

— Liquides : mazout et dérivés, carburants de synthèse.

— Gazeux : gaz naturels, de hauts-fourneaux, de fours à coke, gaz pauvre, gaz à l'eau, gaz d'éclairage.

Ces combustibles sont brûlés dans des chaudières dans les centrales à vapeur ou directement dans des cylindres de moteurs à explosion ou à combustion interne.

La production de l'énergie

Les centrales thermiques géantes

Un des aspects les plus intéressants de l'évolution des méthodes de production de l'énergie est l'accroissement du rendement des centrales à vapeur avec leur puissance moyenne. Ce fait, que la théorie faisait prévoir, a été pleinement confirmé par l'expérience et il est maintenant bien établi que la concentration de la puissance dans des unités de grandes dimensions procure une économie considérable de combustible, lorsque la puissance choisie pour les turbines ne dépasse pas une valeur compatible avec une bonne utilisation du matériel, et quand les valeurs de la pression, de la température de surchauffe, du degré de vide, ont été déterminées de manière à obtenir le rendement optimum à une puissance voisine de la charge moyenne. L'examen du tableau I est particulièrement instructif à ce sujet.

La centrale de Battersea, en Grande-Bretagne, dont la puissance moyenne annuelle est d'environ 130 000 kW n'a qu'une consommation spécifique de l'ordre de 400 g par kWh.

Equipée d'un groupe de 105 000 kW et de deux groupes de 69 000 kW, fonctionnant à la pression de 50 kg/cm², elle a un rendement thermique moyen de 27,63 %. En France, la puissance unitaire ne dépasse guère 50 000 kW. Aux Etats-Unis, un groupe de 208 000 kW a été installé à la « Station Line Power Station » du « Commonwealth Edison System » : ce groupe est à trois corps et est alimenté par de la vapeur à 45 kg/cm².

La limite de puissance possible par corps de turbine à vapeur semble être actuellement de 80 000 kW, soit 240 000 kW en trois corps, compte tenu de toutes les conditions pratiques de réalisation, celle des transports des grosses pièces en particulier.

Les raisons pour lesquelles les centrales à vapeur de grande puissance ont un rendement très supérieur à celui des centrales de faible puissance sont nombreuses et diverses. Au point de vue purement thermodynamique, les recherches effectuées par tous les constructeurs de turbines à vapeur du monde aboutissent aux mêmes

résultats : en augmentant la pression et en poussant la température de surchauffe jusqu'à 500° C on peut atteindre, à la charge optimum, un rendement de 32 % (environ 2 700 calories par kWh, soit environ 380 g de charbon à 7 200 calories/kg). La température de 500° C à la turbine, 550° C à la chaudière, semble être la limite maximum admissible pour la vapeur, dans l'état actuel de la métallurgie. Le rendement maximum semble correspondre à une pression de l'ordre de 100 kg/cm², pour des puissances supérieures à 50 000 kW. Il s'agit là de résultats théoriques vérifiés par l'expérience, les Allemands et les Américains ayant construit des chaudières pouvant fonctionner au point critique de la vapeur d'eau (274° C et 225 kg/cm²).

Au point de vue constructif, le haut rendement est obtenu :

Dans les turbines :

a) En répartissant les aubages entre plusieurs corps de turbines, jusqu'à quatre, de manière à réduire les différences de température dans chaque corps et à permettre la mise en service rapide des turbines;

b) En réchauffant la vapeur admise dans les derniers étages, de manière à réduire la teneur en eau de la vapeur à un taux inférieur à 10 % environ, la présence d'une quantité excessive d'eau dans la vapeur entraînant un « freinage » des machines préjudiciable au rendement;

c) En réchauffant l'eau d'alimentation des chaudières par des soutirages de vapeur effectués en des points convenables du parcours;

d) En poussant la condensation, au moyen d'eau courante, jusqu'à 95 ou 96 % du vide théorique, dans des condenseurs à surface munis de séparateurs et de pompes d'extraction.

Dans les chaudières :

a) En utilisant de très hautes pressions;

b) En utilisant de très grands foyers et de très grandes puissances (la capacité de vaporisation s'approche aux Etats-Unis de 200 tonnes par heure);

c) En brûlant du charbon pulvérisé, avec air primaire d'entraînement et de combustion, et air chaud d'appoint pour achever la combustion;

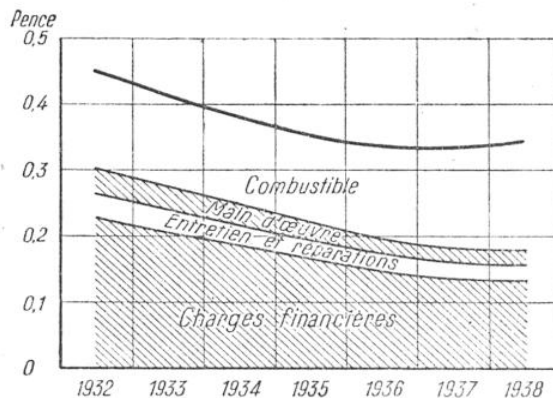


FIG. 2. — LA RÉDUCTION DU PRIX DE REVIENT DU KILOWATT-HEURE DANS LES CENTRALES À VAPEUR DE GRANDE-BRETAGNE ENTRE 1932 ET 1938

Le système d'exploitation individuel des usines prenant fin en 1932, en six ans, une réduction de 22 % a été obtenue sur le prix de l'unité d'énergie, bien que pendant cette période le prix de la tonne de charbon ait crû de 35 %.

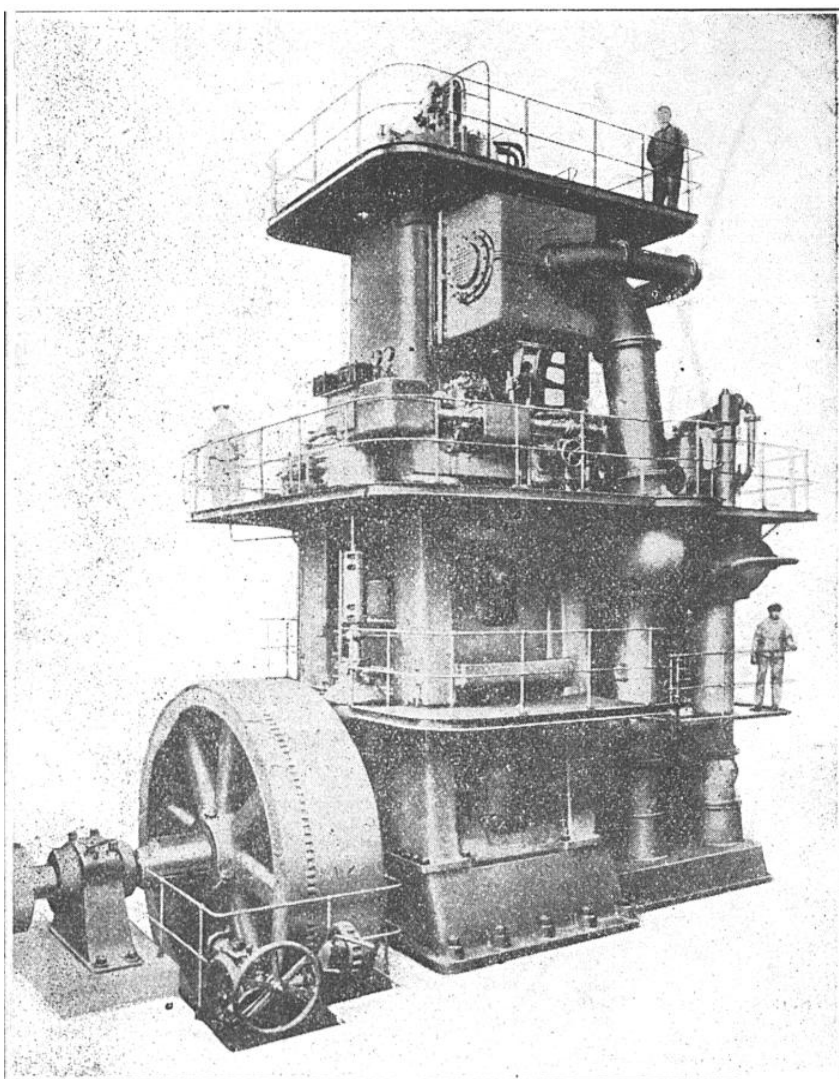


FIG. 3. — MACHINE D'ESSAI MONOCYLINDRIQUE AYANT PERMIS D'ATTEINDRE LA PUISSANCE DE 3 700 CH A LA VITESSE DE 120 TOURS PAR MINUTE, RECORD DE PUISSANCE PAR CYLINDRE POUR UNE MACHINE DIESEL

Le cylindre a un diamètre de 1 m et la course du piston est de 1.90 m. La machine est à double effet et suralimentation. (Compagnie de Constructions mécaniques, Procédés Sulzer.)

T W 40062

Les moteurs à combustion interne

L'œuvre industrielle peut-être la plus féconde en résultats, réalisée au début du XX^e siècle, a été la mise au point des moteurs à combustion interne. Des cycles de transformation de l'énergie calorifique en énergie mécanique ont pu être aménagés, dans lesquels la température atteinte localement dépasse de beaucoup la température de 500° C admissible dans les machines, comme les turbines, où un équilibre doit s'établir entre les températures du liquide moteur et les éléments métalliques, points d'application des actions et des réactions mécaniques. Les températures très élevées, de l'ordre de 2 700° C, atteintes dans les zones de combustion active, ne sont développées que localement et n'ont pas le temps de se communiquer à la masse du fluide, d'ailleurs refroidi par sa propre détente. Les parois des cylindres des moteurs à combustion interne sont en outre refroidies par une circulation continue d'eau et intermittente d'air de balayage. Quand des veines gazeuses hétérothermes pourront agir dans des turbines sur des ailettes refroidies intérieurement d'une façon continue, et superficiellement par un balayage d'air frais, il sera possible d'atteindre avec les turbines des rendements analogues à ceux obtenus avec les moteurs à combustion interne.

Tous les moteurs à combustion interne sont des machines à mouvement alternatif : ils sont maintenant construits à simple ou à double effet, à quatre ou à deux temps, suivant la puissance, la vitesse, la nature du combustible. Ils peuvent être classés en trois catégories distinctes caractérisées à la fois par la nature des combustibles utilisables et par le

mode d'allumage adopté.

Les moteurs à gaz (gaz naturels, gaz de fours à coke, gaz de hauts fourneaux ou de gazogènes), ainsi que les moteurs à essence, sont du type dit à explosion.

Les moteurs Diesel, alimentés avec des huiles lourdes (mazout, gazoil, etc.) sont du type dit à combustion.

Dans les premiers, le mélange explosif d'air et de carburant est soumis à une compression modérée, assez faible pour que des explosions prématurées ne soient pas à craindre ; l'explosion est produite en fin de compression au moyen d'une étincelle électrique chaude ; les gaz brûlés se détendent dans les cylindres et sortent à des températures de l'ordre de 600° C dans les moteurs à gaz, et de l'ordre de 1 000° C dans les moteurs à essence.

Dans les moteurs Diesel, l'air est comprimé à une pression suffisante pour qu'il atteigne une température de l'ordre de 600° C ; le combustible, injecté à grande pression de manière à réaliser une pulvérisation turbulente, s'allume naturellement au contact de l'air chaud ; le mé-

d) En récupérant une grande partie des pertes, par emploi de réchauffeurs d'air et d'eau ;

e) En réglant automatiquement la combustion au moyen d'appareils de contrôle continu de la chauffe, faisant varier la vitesse des moteurs auxiliaires de toutes natures, notamment les ventilateurs amenant à la chaudière l'air chaud nécessaire pour la combustion complète du charbon.

f) En utilisant des appareils de pulvérisation du charbon donnant une poudre de plus en plus fine ;

g) En utilisant des foyers à parois tubulaires, à circulation d'eau, permettant de supprimer presque complètement le matériel réfractaire et récupérant les chaleurs perdues.

Il est clair que ces résultats ne peuvent être obtenus qu'en réalisant les ensembles extrêmement complexes bien que très harmonieux que constituent les grandes centrales modernes. Les hauts rendements constatés résultent d'une suppression, maintenant presque complète, de pertes considérées jadis comme négligeables et qu'il n'est possible économiquement de récupérer que dans des installations très puissantes.

lange se détend et sort des cylindres à une température de l'ordre de 600°C .

Les moteurs à gaz

Ce sont les Maîtres de Forges allemands et anglais qui, organisant dans les usines métallurgiques la chasse aux pertes d'énergie, ont provoqué le développement considérable des moteurs à gaz. Plus de 5 millions de chevaux de moteurs à gaz sont maintenant installés dans le monde, dont près des trois quarts en Europe. Le développement du moteur à gaz a été relativement plus lent aux Etats-Unis qu'en Europe, en raison non seulement de l'abondance et du bas prix du charbon, mais encore de l'avance prise par les Américains en matière d'aménagement de centrales à vapeur. La puissance des moteurs à gaz ne dépasse guère 5 000 à 6 000 chevaux, bien qu'à titre d'essai on ait établi des modèles de 8 000 à 10 000 ch.

Les divers gaz utilisés sont les gaz naturels et les gaz produits en excédent dans les usines métallurgiques. Pour éviter de brûler les cylindres, il est nécessaire de réduire, par admission d'un excès d'air, la chaleur dégagée par mètre cube de mélange à une valeur de l'ordre de 450 cal/m^3 pour les petits moteurs et de 300 cal/m^3 pour les gros moteurs. Cette limitation pratique rend les gaz pauvres, comme les gaz de hauts fourneaux ou de gazogènes particulièrement bien adaptés à l'alimentation des moteurs à gaz.

Les gaz riches sont de plus en plus utilisés pour les distributions de gaz d'éclairage ou de chauffage domestique. Le gaz de haut fourneau est même maintenant utilisé pour le chauffage des fours à coke, afin de réserver à la distribution les gaz riches obtenus par distillation du charbon.

Les centrales à moteurs Diesel

Les travaux de Rudolf Diesel (1893) ont ouvert à l'industrie de l'énergie un champ prodigieusement fécond puisque, depuis 40 ans, après l'essai du premier moteur industriel (1897), plus de 15 millions de chevaux de moteurs-Diesel ont été mis en service. Ce moteur constitue le transformateur d'énergie thermique en énergie mécanique ayant le rendement le plus élevé (35 % et plus, 42 % même pour certains moteurs à l'essai).

Les moteurs à combustion interne ont un rendement qui varie peu avec la puissance, mais les difficultés de construction augmentent quand

les dimensions des cylindres dépassent certaines limites. La puissance, proportionnelle au cube des dimensions linéaires, croît plus vite que la surface de refroidissement qui n'est proportionnelle qu'au carré des dimensions; les difficultés de refroidissement limitent donc actuellement la puissance par cylindre. On est cependant parvenu à atteindre la puissance de 3 000 ch par cylindre et à envisager la construction de moteurs de 30 000 ch.

Dans la situation actuelle de la technique, il n'existe pas de centrale à moteur à combustion interne de puissance supérieure à 50 000 ch en deux unités. Pour aller plus loin et bénéficier à la fois des avantages de la combustion interne

et de la concentration des puissances, il faut envisager soit l'emploi d'un grand nombre de groupes, soit une combinaison de moteurs Diesel et de moteurs d'un autre type (1).

Les turbines à gaz

Il serait possible théoriquement d'obtenir avec une turbine à gaz des rendements analogues à ceux déjà obtenus pratiquement dans le moteur Diesel, si nous disposions de métaux résistant

aux températures pour lesquelles la turbine à gaz a un rendement élevé. Dans l'état actuel de la métallurgie, il ne paraît pas possible d'utiliser des gaz à une température supérieure à 550°C , l'ailetage prenant nécessairement, quand il est parcouru par un flux continu, la température du gaz d'alimentation.

Il faut donc brûler le combustible dans un excès d'air tel que les produits de la combustion ne dépassent pas cette température limite. Il faut ainsi compter sur 60 kg de gaz par kg de combustible pour 550°C ; pour 335°C , il faudrait environ 100 kg d'air. L'installation devra donc comprendre, en plus de la chambre de combustion, un groupe de trois machines montées sur le même arbre : la turbine à gaz, la soufflante, l'alternateur. Dans l'état actuel de la technique des machines rotatives, on peut obtenir un rendement de l'ordre de 80 % pour le compresseur et de 88 % pour la turbine,

(1) Nous ne parlerons pas ici des moteurs à explosion à deux ou quatre temps, dont le succès a été aussi grand que celui des moteurs Diesel et qui sont presque exclusivement utilisés sur les automobiles et les avions, bien que l'emploi des moteurs Diesel s'étende de plus en plus, même dans ces domaines. Le rendement des moteurs à explosion est notablement plus faible que celui des moteurs à combustion, en raison du faible taux de compression admissible avec de bonnes conditions d'allumage.

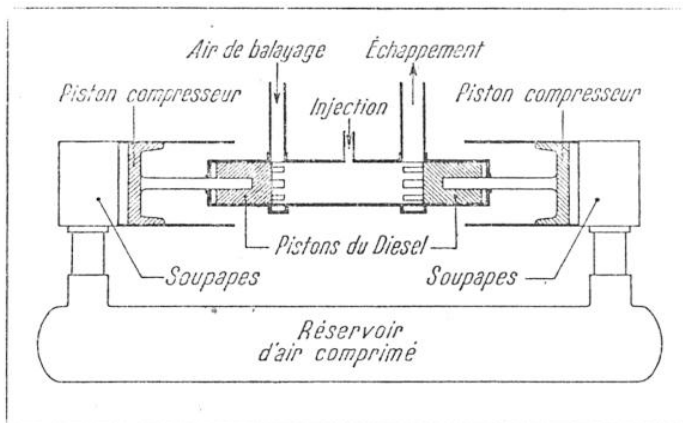


FIG. 4. — SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN COMPRESSEUR A PISTONS LIBRES

Les deux pistons qui se déplacent dans le cylindre du moteur Diesel sont reliés par des bielles non représentées ici. Les deux larges pistons qui en sont solidaires compriment de l'air dans le réservoir.

soit 70 à 75 % pour l'ensemble des deux machines; dans ces conditions, le rendement global du groupe peut s'élever à 16 % environ.

Ce rendement relativement faible tient à ce que les gaz entrant à 550° C et sortant à 335° C environ, on n'a utilisé qu'une faible chute de température dans la machine. Il est possible d'améliorer notablement le rendement du système en faisant passer les gaz encore très chauds dans un réchauffeur d'air dans lequel l'air comprimé sortant de la soufflante est chauffé par les gaz d'échappement de la turbine. L'utilisation d'air déjà chaud pour la combustion du mazout augmente la quantité de chaleur utilisable dans la turbine. Pour la même température d'admission dans la turbine, le rendement global atteint 23 % environ.

L'installation comprend alors quatre éléments distincts : la chambre de combustion et l'économiseur, appareils statiques, et deux groupes tournants : le turbo-compresseur à vitesse réglable, et le turbo-alternateur à vitesse constante.

Les générateurs à pistons libres

Dans la situation actuelle de l'industrie métallurgique, il nous paraît donc possible d'atteindre avec la turbine à gaz des rendements aussi élevés que ceux déjà obtenus avec les turbines à vapeur de grande puissance. On comprend donc que des recherches aient été entreprises en vue d'obtenir des groupes « compound » composés de générateurs de gaz comprimés et chauds et de turbines à gaz de grande puissance. Les compresseurs à pistons libres forment avec le cylindre Diesel d'entraînement la chambre de combustion de la turbine à gaz qu'ils alimentent. De pareils groupes paraissent susceptibles de donner des rendements supérieurs aux groupes chaudières à vapeur-turbo-alternateurs, tout en étant peut-être plus simples et moins encombrants. Dans cet ordre d'idées, les générateurs à pistons libres semblent devoir prendre dans l'avenir une place importante pour la production massive de l'énergie, partout où les questions d'encombrement et de poids jouent un rôle prépondérant bien qu'ils ne permettent pas de brûler d'autres combustibles liquides que ceux déjà utilisables dans les moteurs Diesel.

Les compresseurs à pistons libres comprennent essentiellement un cylindre de moteur Diesel à 2 temps, muni de deux pistons pouvant

se déplacer en sens opposés. Ces pistons sont reliés par des bielles ou tout autre mécanisme assurant le synchronisme de leurs mouvements de sens contraires, mais ne transmettant aucun effort moteur.

Les deux pistons sont projetés comme des projectiles et c'est la force vive de chacun qui est transformée en travail utile par la compression d'une certaine masse d'air.

Pour le moment, de pareils groupes sont encore dans la période d'essai et il ne paraît pas

possible d'envisager la construction de générateurs à pistons libres d'une puissance supérieure à 2000 ch. Il faudrait donc grouper un grand nombre de pareils générateurs en parallèle pour alimenter une turbine de grande puissance. Les essais effectués avec de tels générateurs ont montré qu'ils permettaient d'obtenir avec un rendement de l'ordre de 40 % des gaz chauds et comprimés utilisables pour l'alimentation d'une turbine à gaz, l'air comprimé produit étant alors utilisé à trois fins : le balayage des cylindres du Diesel, le retour des pistons à leurs positions initiales, l'alimentation de la turbine à gaz après mélange avec les gaz d'échappement du Diesel. Comme le rendement d'une turbine à gaz peut atteindre 85 à 90 %, on voit que la transformation de l'énergie potentielle du combustible en énergie utilisable sur l'arbre de la turbine se fera avec un rendement, à la charge optimum, de l'ordre de 34 %. Tous les perfectionnements

apportés au fonctionnement des turbines permettront de rapprocher le rendement de pareils groupes de celui des moteurs Diesel suralimentés.

Dans la disposition classique du moteur Diesel suralimenté, l'alternateur est commandé par le Diesel et la soufflante par la turbine à gaz d'échappement; dans le dispositif à pistons libres, les cylindres Diesel commandent les compresseurs d'air et la turbine d'échappement l'alternateur.

La « concentration » de l'énergie, facteur de rendement

Notons que, dans les divers types de machines ou de groupes de machines considérés, l'obtention de hauts rendements est intimement liée à la « concentration » de l'énergie, c'est-à-dire à l'allure de combustion du combustible.

Dans un moteur Diesel, on développe norma-

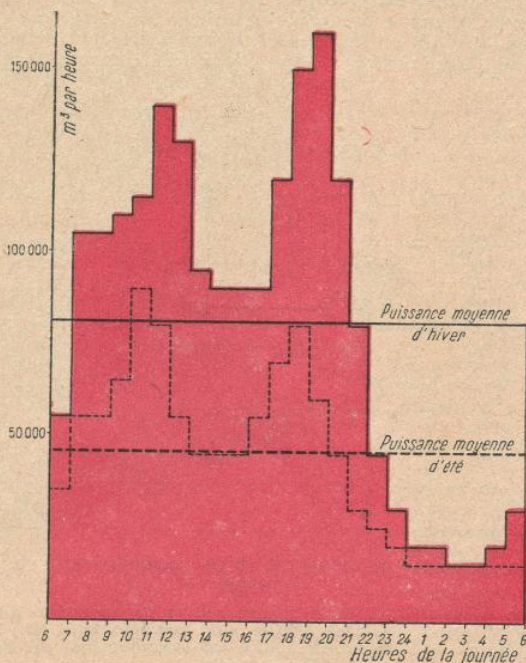


FIG. 5 — DEUX COURBES DE CHARGE CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU DE LA COMPAGNIE DU GAZ DE PARIS. En ordonnées ont été portés les nombres de mètres cubes débités par heure. La courbe en trait interrompu se rapporte à une journée d'été (facteur de pointe 1,74) et la courbe en trait plein à une journée d'hiver (facteur de pointe 1,98). L'examen de cette courbe montre que la compensation des variations du débit horaire exige bien une accumulation de gaz de l'ordre du quart du débit journalier.

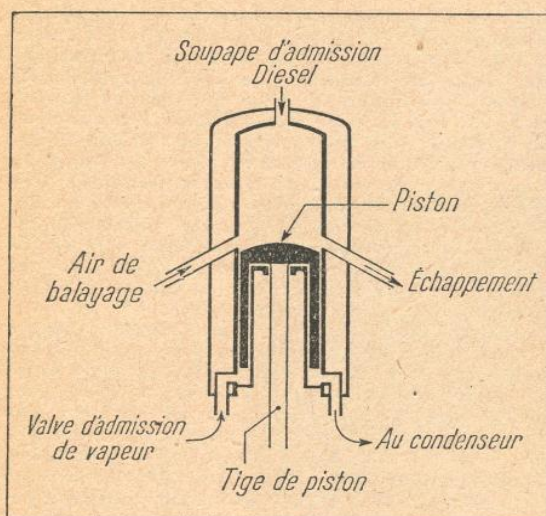


FIG. 6. — SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN CYLINDRE DE MOTEUR STILL

Le piston est soumis à l'action des gaz brûlés suivant le processus des moteurs Diesel à deux temps dans la partie supérieure du cylindre. Il est soumis à l'action de la vapeur provenant d'une chaudière auxiliaire pendant la course retour.

lement une puissance de 10 ch par litre de cylindrée avec une consommation horaire de 200 g par ch-h : l'allure de combustion est donc de 20 millions de calories par heure et par mètre cube. Dans les moteurs de course à explosion, cette allure de combustion est plus que doublée.

Dans une chambre de combustion de chaudière Velox l'allure de combustion atteint 7 ou 8 millions de calories par mètre cube; elle est du même ordre de grandeur que l'allure de combustion des foyers des locomotives américaines où 1 000 à 1 200 kg de charbon sont brûlés par mètre carré de surface de grille et par heure.

Dans les foyers des chaudières des grandes centrales modernes brûlant du charbon pulvérisé, on atteint des allures de 700 000 à 800 000 calories par mètre cube et par heure, avec le degré de pulvérisation actuellement pratiqué. Avec des poudres plus fines, on pourrait réaliser des combustions encore plus rapides, et Rosin a montré que pour des grains de charbon d'un diamètre de l'ordre de 10 microns, on aurait, à une pression voisine de la pression atmosphérique, des allures de combustion de l'ordre de 20 millions de calories par mètre cube et par heure, analogues à celles pratiquées dans les moteurs Diesel à combustible liquide.

Il est clair que les chambres de combustion des turbines à gaz pourront être aisément alimentées avec du charbon pulvérisé; mais il est possible aussi que l'on arrive à

brûler directement, comme l'avait pensé Rudolf Diesel lui-même, le charbon très finement pulvérisé dans de l'air chaud fortement comprimé.

Quelle que soit l'évolution de la technique de construction des grandes centrales thermiques, il semble que des perfectionnements extrêmement importants soient possibles, et que des rendements moyens de l'ordre de 30 % puissent être prochainement dépassés.

L'accumulation de l'énergie

Quel que soit l'objet d'une distribution, l'adaptation de l'offre à la demande se fait par application de deux pratiques distinctes : l'accumulation et l'interconnexion. L'accumulation permet le transfert de l'énergie dans le temps, l'interconnexion permet le transfert de l'énergie dans l'espace.

Dans toutes les installations ayant pour objet des distributions de matières : eau, gaz, vapeur, l'accumulation directe est possible dans des réservoirs de forme appropriée : bassins, gazomètres, accumulateurs de vapeur. Dans les installations électriques, l'accumulation est possible indirectement par l'intermédiaire d'une transformation électrochimique ou électromécanique. L'accumulation électrochimique est encore assez employée dans les distributions à courant continu : appareils de traction de toutes natures (locomotives, automotrices, automobiles, sous-marins); appareils à courants faibles de tous systèmes (signalisation, ferroviaire ou routière, téléphonie, télégraphie, télécommande), mais les allures de réaction sont, dans l'état actuel de la technique, beaucoup trop lentes pour que l'accumulation électrique soit économiquement utilisable dans tous les cas.

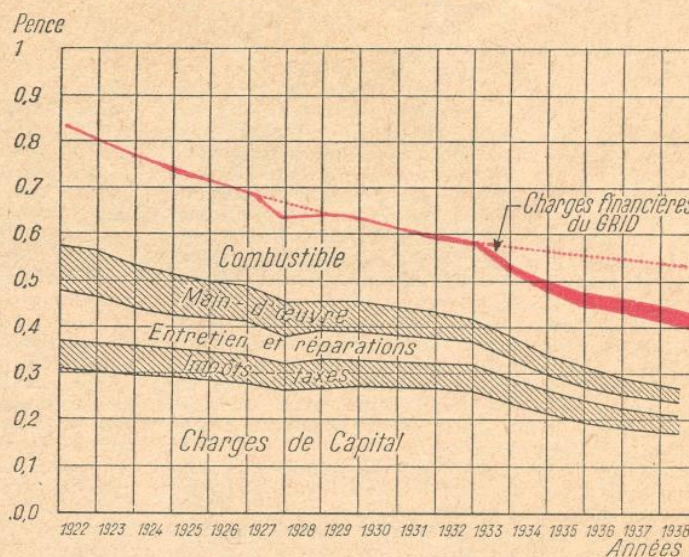


FIG. 7. — LA RÉDUCTION DU PRIX DE VENTE DU KWH, CONSÉQUENCE DE L'INTERCONNEXION

Ce graphique a été tracé en ramenant les valeurs portées en ordonnées aux conditions économiques de 1927 à 1930, périodes de stabilité, en particulier pour les prix du charbon et de la main-d'œuvre. Le prix de vente considéré est celui de vente aux réseaux régionaux qui permet de tenir compte à la fois des pertes de transmission et des dépenses afférentes à la construction et à l'exploitation du « Grid ». Dans ces conditions, l'économie nette réalisée en 1938 était de l'ordre de 17 % en valeur relative et 8,2 millions de livres sterling en valeur absolue.

L'accumulation électromécanique est beaucoup plus facilement réalisable en passant par l'intermédiaire d'une transformation réversible ou irréversible; elle est industriellement pratiquée par accumulation d'eau dans des lacs naturels ou artificiels, par accumulation de combustible dans les parcs à charbon ou les réservoirs d'huile des centrales thermiques. Dans ce cas, l'énergie accumulée n'est disponible qu'avec un certain retard, correspondant à la mise en route d'une turbine hydraulique, d'un moteur Diesel, d'un groupe chaudière-turbine à vapeur. Ces retards varient entre une heure et quelques minutes suivant les cas, la mise en service d'une unité arrêtée étant presque instantanée pour les usines hydrauliques à réservoir accumulateur, de quelques minutes pour les moteurs à explosion ou à combustion interne. Dans le cas des centrales à vapeur, le retard est de l'ordre d'une heure si on part d'un groupe chaudière-turbine complètement froid, d'une demi-heure si la chaudière est en veilleuse et la turbine froide, d'un quart d'heure si on part d'une chaudière en réserve et d'une turbine froide, de quelques minutes si chaudière et turbine sont en réserve.

Dans une centrale hydraulique, l'accumulation peut-être réalisée soit par apport direct d'eau d'une rivière dans un réservoir, soit par pompage de l'eau d'un lac inférieur vers un lac supérieur.

L'accumulation électrique

Dans certaines industries comme celle du gaz, le réglage est effectué presque uniquement par le jeu des réservoirs accumulateurs ou gazomètres, étant donné la lenteur avec laquelle peuvent s'effectuer les changements de régime des générateurs. La mise en service d'un four à gaz d'éclairage exige un délai de l'ordre de 48 heures, et celle d'un four de gaz à l'eau, de 7 à 8 heures. La production de gaz doit donc être considérée comme pratiquement constante dans de larges intervalles de temps, et la capacité des gazomètres doit être assez grande pour assurer la fourniture de gaz aux heures de pointe et l'accumulation pendant les heures creuses. La « règle des gaziers » fixe la capacité globale des gazomètres à une valeur comprise entre 75 et 80 % de la demande journalière de gaz, le jour le plus chargé de l'année. Puisque les changements d'allure de production ne peuvent se faire qu'avec un retard de 48 heures, cette règle signifie en réalité que la capacité des réservoirs est calculée sur la base d'une compensation journalière des débits de gaz de 25 %, soit 50 % pour deux jours, et 25 à 30 % pour parer à un accident à une usine ou à une canalisation.

L'étude de la règle des gaziers présente pour les électriciens un grand intérêt, car les courbes de variations journalières de charge, débits horaires de gaz ou d'énergie électrique dans les grandes agglomérations sont tout à fait analogues. Il est clair par conséquent que la compensation de l'offre et de la demande pour l'énergie électrique pourrait être assurée, à puissance journalière constante des centrales électriques, en disposant d'une accumulation d'énergie correspondant au quart de la production journalière du jour le plus chargé de l'année : dans cette hypothèse, pour la production globale annuelle des centrales françaises de 20 milliards de kWh (qui correspond à une consommation journalière moyenne de 55 millions de

kWh et une consommation journalière de 80 millions de kWh le jour le plus chargé de l'année) la règle des gaziers conduirait à une accumulation de l'ordre de 20 millions de kWh dans des « réservoirs journaliers ». Mais nous avons vu que dans le cas le plus défavorable il ne pouvait se produire un retard supérieur à une heure entre l'offre et la demande dans les centrales électriques. On voit donc que l'exploitation d'un réseau d'énergie électrique alimentant la France entière pourrait être assurée en toute sécurité par l'aménagement d'accumulateurs de 600 000 ou 700 000 kW répartis entre 5 ou 6 batteries susceptibles de fournir leur puissance pendant une durée maximum d'une heure.

Des accumulations d'énergie correspondant à la production de puissances de l'ordre de 100 000 à 150 000 kW pendant des durées de l'ordre d'une heure sont réalisables aussi bien avec des accumulateurs électriques (1) qu'avec des réservoirs hydrauliques ou thermiques. Mais il ne paraît guère possible de réaliser des accumulations permettant une régularisation saisonnière autrement qu'avec des réservoirs hydrauliques, des lacs naturels ou artificiels.

L'accumulation hydraulique

L'accumulation hydraulique est la seule qui soit systématiquement réalisée dans tous les cas où les travaux d'aménagement des réservoirs n'entraînent pas des dépenses prohibitives, qu'il s'agisse de centrales thermiques ou de centrales hydrauliques.

L'accumulation naturelle par afflux d'eau d'une rivière dans un réservoir est la plus simple et la plus économique, mais des calculs précis ont montré que l'accumulation par pompage était techniquement désirable et financièrement viable dans tous les cas où la configuration du sol permettrait l'aménagement de réservoirs supérieurs et inférieurs en des points pas trop éloignés des usines génératrices principales (2). Même dans le cas d'usines thermiques brûlant du charbon de choix amené dans les parcs par eau ou par rail, l'accumulation hydraulique permet une économie de combustible, économie d'autant plus élevée que le rendement des groupes motopompes est lui-même meilleur.

Chaque groupe installé dans l'usine comprend en principe : une turbine, une pompe, un moteur, le plus souvent synchrone, pouvant fonctionner indifféremment en générateur et en moteur à la même vitesse. Des accouplements électriques et hydrauliques permettent d'embrayer ou de débrayer la pompe du moteur.

De nombreuses installations de turbinage et de pompage conjuguées ont été réalisées dans ces dernières années en Europe. En France, au moment où l'énergie électrique du Rhin a étudié les installations de Kembs, on s'est préoccupé de la question accumulation et environ 175 millions de kWh de « déchet » sont utilisés pour pomper l'eau du lac Noir (réservoir inférieur) dans le lac Blanc (réservoir

(1) L'installation de batteries d'accumulateurs d'une capacité globale de 100 000 kWh en une heure ou en trois quarts d'heure ne paraît pas irréalisable. Le métropolitain de Paris utilise dans ses sous-stations des batteries-tampons d'accumulateurs, d'une capacité globale d'environ 18 000 kWh. Les capacités des batteries dont il est question ici ne seraient donc que cinq à six fois plus grandes que celles des batteries du métropolitain de Paris.

(2) Voir : « L'aménagement du lac de la Girotte » (*Science et Vie*, n° 110, août 1926).

supérieur). Cette installation permet de rendre disponibles aux heures de pointe plus de 100 millions de kWh.

L'utilisation des grands réservoirs accumulateurs a fait l'objet d'études très poussées dans tous les pays du monde, et on envisage l'aménagement des réservoirs de Gatun (Panama), de Gonin (Québec), des lacs Nipigou et Seul (Ontario), d'Assuan (Egypte). Les capacités de ces lacs naturels ou artificiels sont considérables; elles s'élèvent à 2,2 milliards de mètres cubes pour Assuan et elles s'échelonnent entre 4,1 et 8,2 milliards de mètres cubes pour les lacs américains.

Il semble que des accumulations importantes d'eau pourraient être également réalisées au voisinage des grandes capitales si elles étaient étudiées en même temps que les travaux d'adduction d'eau de consommation.

A Londres, par exemple, les réservoirs d'eau ont une capacité globale d'environ 80 millions de mètres cubes, 78 millions pour les eaux de rivière et 1,3 millions pour les eaux filtrées. Ces capacités correspondent respectivement à 50 et 0,9 fois la consommation

journalière maximum d'été de l'agglomération londonienne (1 400 km² et 7,5 millions d'habitants). Pour l'alimentation en eau de New York, nous trouvons des chiffres encore plus importants. Les eaux du Croton, du Rondout et de la Delaware ont été captées: la digue de Croton, de 90 m de hauteur, retient un volume d'eau de 114 millions de mètres cubes, et les digues du réservoir d'Ashekan retiennent 492 millions de mètres cubes. Avant l'entrée dans la presqu'île de Manhattan, le réservoir de Kensico a été aménagé: il contient 109 millions de mètres cubes. Dans New York même des réservoirs énormes ont été construits, tels celui de Hillview de 3,4 millions de mètres cubes, et celui de Jerome

Park de 6,8 millions de mètres cubes. Certains de ces réservoirs sont établis en des points dépassant d'au moins une dizaine de mètres la hauteur moyenne des maisons. Nous n'avons cité ces chiffres que pour faire ressortir l'intérêt qu'il y aurait pour l'équipement des grands services publics municipaux à réaliser une collaboration

étroite entre les ingénieurs chargés, les uns des adductions d'eau, les autres des distributions d'électricité.

Les accumulateurs de vapeur et d'eau chaude

C'est Rateau qui semble avoir songé le premier à utiliser les vapeurs d'échappement des machines à vapeur à marche intermittente des usines métallurgiques en les rassemblant dans des réservoirs calorifugés. Smoots a appliqué en Angleterre le même principe aux machines d'ateliers. L'accumulateur de vapeur Ruth, très employé en Allemagne et en Angleterre n'est qu'un perfectionnement du système Rateau: il comprend essentiellement un réservoir calorifugé de grande capacité installé entre les chaudières d'une centrale à vapeur

et les cylindres basse pression des turbines: autrement dit, l'accumulateur « shunte » les cylindres haute pression des turbines. Deux valves permettent de régler le passage de la vapeur, l'une de la chaudière au réservoir, en cas de réduction de la charge de la centrale, l'autre du réservoir aux cylindres basse pression des turbines, en cas d'augmentation de la charge de la centrale.

L'accumulateur de vapeur permet de régulariser le débit des chaudières avec une perte franchement consentie de l'ordre de 15 %; mais cette régularisation permet non seulement de réduire les dépenses d'établissement de la chaufferie (un accumulateur ne coûte à capacité égale que 40 % du prix de la chaudière qu'il remplace), mais encore une économie de consom-

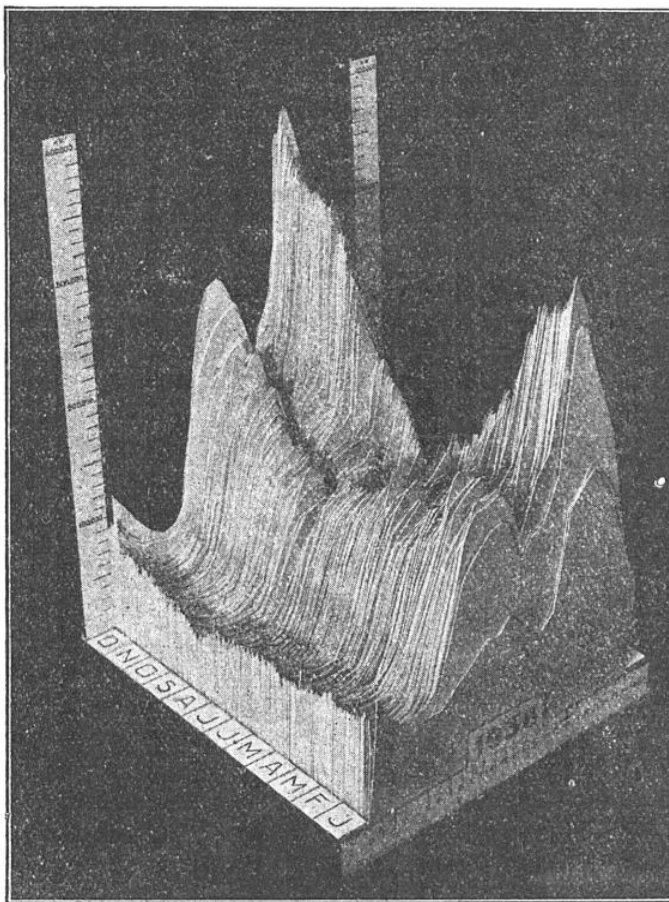


FIG. 8. — LA « MONTAGNE DE CHARGE » DU RÉSEAU DE LA COMPAGNIE PARISIENNE DE DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ POUR 1938.

La courbe de charge étant découpée chaque jour, on accole les 365 courbes de l'année pour former une surface de forme caractéristique, qui met bien en évidence une double périodicité, journalière et saisonnière, les maxima ayant lieu en décembre et les minima en juin.

mation de combustible due à l'accroissement d'utilisation de l'ensemble de l'installation.

Les plus grandes batteries d'accumulateurs Ruth sont celles installées par la Société Newag dans la centrale de Charlottenburg, en Allemagne. Elles ont une capacité de 67 000 kWh.

D'autre part, une quantité considérable d'énergie est perdue dans l'eau de refroidissement des cylindres de moteurs à explosion ou à combustion, ainsi que dans les gaz d'échappement de ces mêmes moteurs.

Le problème de la récupération de ces énergies dégradées est à l'ordre du jour depuis trente ans et les résultats obtenus ont dépassé toute attente en ce qui concerne le gaz d'échappement dont la température est suffisante (environ 600° C dans les moteurs à gaz) pour assurer le chauffage des chaudières. Le problème de l'utilisation des calories contenues dans de l'eau chauffée à 60 ou 80° C est moins bien résolu. On peut, dans certains cas, utiliser cette eau pour l'alimentation des chaudières en la réchauffant au moyen de soutirages effectués dans les turbines : ce mode d'utilisation est le plus efficient mais il n'est pas toujours réalisable. On peut aussi essayer de transformer en énergie mécanique l'énergie thermique de l'eau chaude. Ce problème de l'utilisation mécanique de la chaleur sous de faibles différences de température est celui qu'a posé d'une façon particulière l'application du procédé Claude-Boucherot pour l'énergie thermique des mers tropicales (1) ou du procédé Barjot pour l'utilisation de l'énergie thermique des mers glaciales (2). Ces transformations ont nécessairement un rendement déplorable, le rendement théorique ne dépassant pas

15 % pour une différence de température de 50° C et 6,5 % pour une différence de 20° C. Mais le rendement thermique n'a dans le cas des récupérations qu'un intérêt secondaire, le rendement économique étant le seul qui importe pratiquement.

La chasse aux pertes de chaleur a conduit M. Still à la réalisation d'un moteur mixte Diesel-vapeur, souvent réalisé sous la forme d'un système de deux moteurs conjugués.

En principe l'eau de circulation d'un moteur Diesel, déjà échauffée par son passage dans l'enveloppe des cylindres, est utilisée pour l'alimentation d'une chaudière auxiliaire après passage dans un réchauffeur soumis à l'action des gaz d'échappement du Diesel. Ces gaz se refroidissent de 600° C à 160° C environ.

Les essais effectués par la marine anglaise sur un moteur Still de 1 250 ch ont fait ressortir un rendement de 41 % environ pour la puissance indiquée et de 35 % pour la puissance effective.

L'interconnexion électrique

L'interconnexion électrique est un mode physique de transport de l'énergie analogue aux mo-

des de transports matériels et il ne diffère de ceux-ci que par l'absence de mouvements tangibles de matière.

Les avantages de l'interconnexion résultant de la multiplicité des « sources » et de la diversité des « charges » sont beaucoup plus importants que ceux que faisaient prévoir les évaluations les plus optimistes. Les statistiques relevées dans divers pays permettent de préciser maintenant les résultats acquis et de justifier le développement des réseaux interconnectés, développement qui s'est étendu du domaine régional au domaine national pour aboutir au domaine continental.

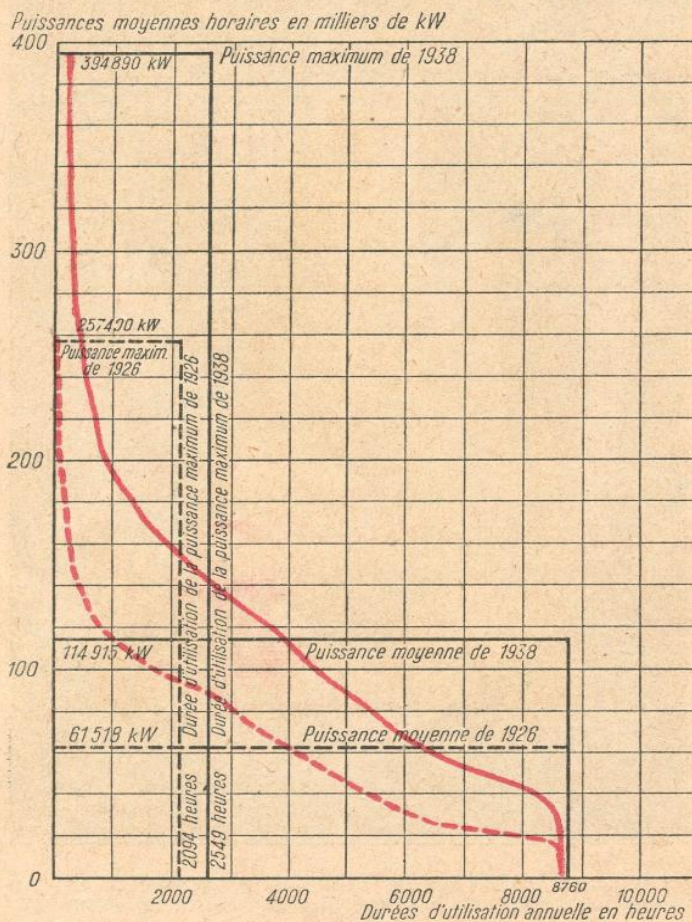


FIG. 9. — COURBE DES PUISSANCES CLASSÉES DU RÉSEAU DE LA C.P.D.E. (PARIS) POUR LES ANNÉES 1926 ET 1938

On a porté en ordonnées les puissances moyennes horaires et en abscisses les nombres d'heures pendant lesquelles le réseau a débité, dans l'année, à cette puissance.

(1) Voir : « L'usine tropicale Claude-Boucherot » (*Science et Vie*, n° 163, septembre 1931).

(2) Voir : « L'usine polaire du Docteur Barjot » (*Science et Vie* n° 147, septembre 1929).

La multiplicité des sources d'énergie

La multiplication des sources d'énergie présente des avantages considérables au point de vue de la sécurité et de l'économie.

En ce qui concerne la sécurité, il est clair que plus le nombre de groupes en service est grand, quelle que soit la nature des moteurs primaires qui les composent, moins il y a de chances d'interruption de la fourniture en cas d'arrêt accidentel d'un groupe.

Supposons pour fixer les idées que 7 groupes de machines soient en service et que les machines de chaque groupe fonctionnent à 85 % de leur charge maximum : la puissance disponible sera égale aux 15 centièmes de la puissance demandée au moment considéré. En cas de mise hors service d'un groupe, il n'y aura pas de trouble dans l'alimentation, puisque la puissance encore disponible, $0,15 \times 6$, est supérieure à la puissance disparue. Plus le nombre de groupes ou de centrales marchant en parallèle sera grand, moins la suppression éventuelle d'une centrale sera dangereuse pour la continuité de la fourniture d'énergie. Autrement dit, plus il y aura de centrales en service, plus la charge de chacune d'elles pourra être voisine de sa valeur maximum.

Dans les réseaux modernes interconnectés, le nombre des centrales marchant en parallèle peut se compter par dizaines et l'utilisation du matériel générateur augmente de ce fait automatiquement.

Dans les réseaux mixtes ou exclusivement hydrauliques, la condition de continuité de la fourniture semble *a priori* devoir entraîner un accroissement notable de l'importance des machines en service, en raison de l'irrégularité inéluctable du débit des rivières. En fait, les irrégularités de la puissance peuvent être atténuées et même complètement compensées par le jeu des réservoirs saisonniers.

L'interconnexion permet d'autre part de réaliser des économies massives sur les dépenses de premier établissement des usines génératrices. Dans le cas de la Grande-Bretagne, par exemple, la Central Electricity Board évalue ces économies à 22 millions de livres sterling, soit 3 milliards de francs environ, au cours de la livre au début de 1938. Cette économie compense environ les trois-quarts de la dépense engagée pour la construction du « grid » (réseau anglais d'interconnexion) et de ses annexes.

L'économie tient non seulement à la réduction de la puissance globale des réserves, mais aussi à la réduction du nombre des unités nécessaires pour obtenir une puissance donnée. Le prix par kilowatt installé d'une unité de 100 000 kW n'est que les deux tiers de celui de 10 groupes de 10 000 kW en ce qui concerne la machinerie seule, et la tendance actuelle est d'utiliser des groupes de plus en plus puissants. Dès avant la guerre, des unités de 160 000 kW ont été installées aux Etats-Unis, de 100 000 kW en Allemagne et en Angleterre. La puissance des unités

motrices ne dépend plus guère que des considérations relatives aux possibilités de transport sur rail ou aux possibilités d'alimentation en eau de refroidissement des condenseurs.

Les avantages économiques de l'interconnexion ne peuvent être chiffrés dans leur ensemble qu'en considérant les dépenses globales d'exploitation, charges financières comprises.

La diversité des charges

Un phénomène extrêmement important se révèle quand s'étend l'application de l'interconnexion : la diminution de la pointe de charge ou, ce qui revient au même, l'aplatissement de la courbe de charge quand la puissance moyenne augmente.

La courbe de charge totale est la somme arithmétique d'un grand nombre de charges individuelles qui peuvent être classées en un certain nombre de catégories : charges commerciales, charges industrielles, charges domestiques, charges

d'éclairage public. Les courbes de charge correspondant à chacun de ces services ont des allures nettement différentes les unes des autres. Une régularisation de la charge globale de chaque catégorie se produit du fait de la non coïncidence des pointes de charge élémentaires de même nature; une compensation de la charge totale du réseau se produit du fait des différences d'allures des courbes de charge globale de diverses catégories. Ce phénomène est en tous points analogue à celui que l'on constate dans toutes les organisations collectives à grand nombre de participants : services publics d'eau, de gaz, de vapeur, etc. ou services privés, tels que banques, assurances, mutuelles de toutes sortes, etc. Dans les réseaux de chemins de fer électrifiés, par exemple, la courbe de charge totale résulte de la superposition des courbes de charge globale correspondant les unes aux trains de marchandises, de

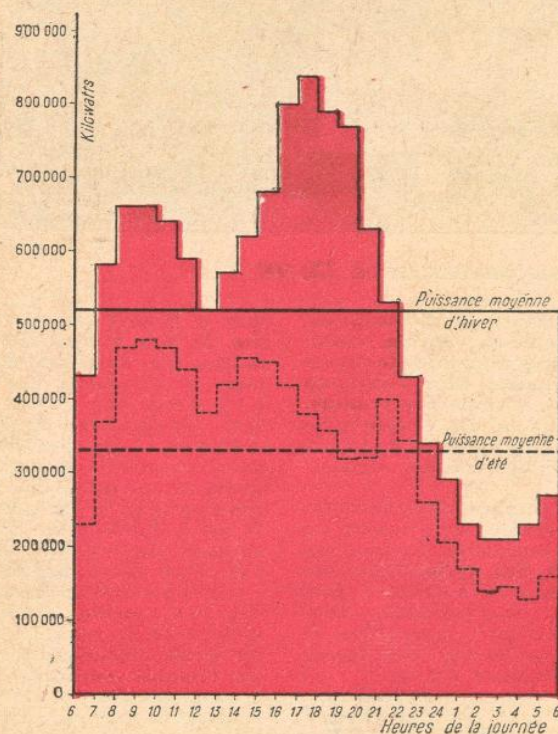


FIG. 10. — COURBES DE CHARGE DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ DE LA RÉGION PARISIENNE. La courbe en trait interrompu se rapporte à une journée d'été (facteur de pointe 1,52) et celle en trait plein à une journée d'hiver (facteur de pointe 1,73). En ordonnées ont été portées les moyennes horaires de la puissance.

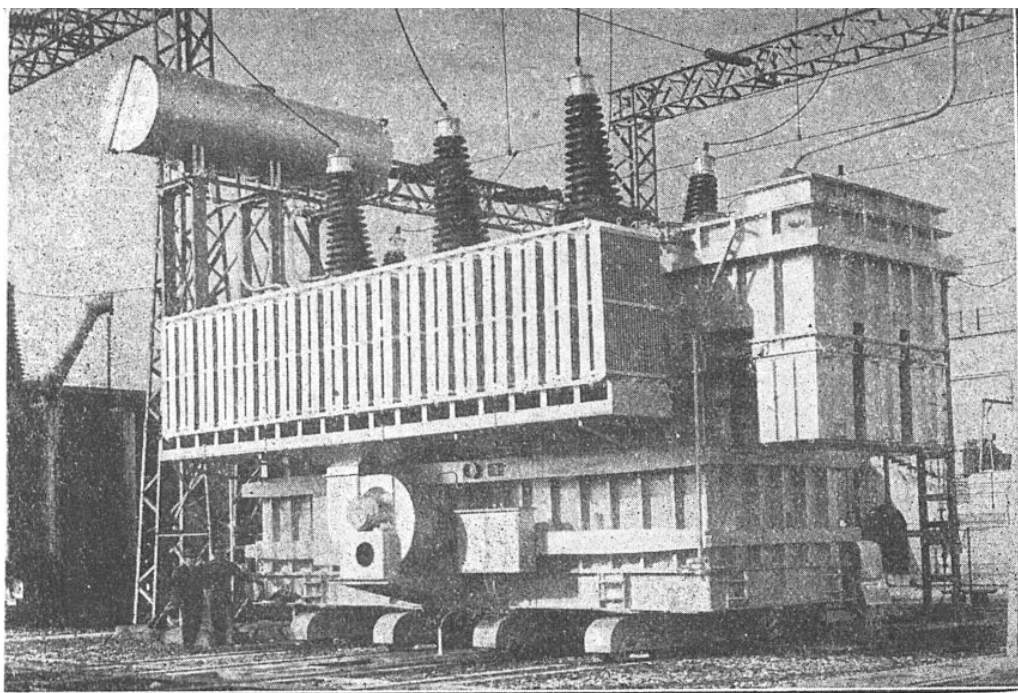


FIG. 11. — UN TRANSFORMATEUR POUR 220 000 V

transit ou de détail, aux trains de messageries, aux trains de voyageurs rapides, express, omnibus, de banlieue. A chaque catégorie de trains correspond une courbe globale déjà beaucoup plus régulière que celle des trains composants, et la courbe de charge totale est encore plus régulière que les courbes de charge globale, du fait de la diversité d'allure des courbes élémentaires.

Dans tous les services publics dans lesquels les courbes de débit sont tracées en fonction du temps, on constate des variations doublement périodiques superposées à des variations d'ensemble plus ou moins régulières, caractéristiques du développement général de l'industrie considérée. Cette double périodicité, journalière et saisonnière, résulte inéluctablement des conditions normales du travail humain (fig. 8).

On représente souvent la charge des réseaux comme les débits des rivières par des courbes de *débits classés*, que l'on désigne quelquefois sous le nom de « courbes monotones de puissances » (fig. 9 et 10).

Pour caractériser simplement l'allure de ces courbes de charge, on utilise fréquemment un paramètre définissant le rapport entre la puissance maximum et la puissance moyenne : ce rapport est le *facteur de pointe*. A partir de ce facteur de pointe, on peut définir un autre paramètre également très employé : le quotient du nombre d'heures de l'année (8760), par le facteur de pointe définit l'*utilisation annuelle* de la puissance maximum. C'est en somme le nombre d'heures pendant lequel le réseau travaillant à sa puissance maximum fournirait la même quantité d'énergie qu'il en fournit effectivement pendant toute l'année. Il est clair que les résultats de l'exploitation d'un réseau seront d'autant plus heureux que son utilisation annuelle sera plus forte, ou, ce qui revient au même, que son « facteur de pointe » sera plus voisin de l'unité.

Les statistiques du Central Electricity Board nous fournissent sur les variations de l'« utilisation » du réseau britannique de précieuses indications. En 1928, elle n'était que de 1 700 heures, mais elle a progressivement augmenté pour atteindre 3 000 heures en 1938. En France, l'« utilisation » du réseau national serait

notablement plus grande et de l'ordre de 4 500 heures, si on croit les statistiques, d'ailleurs incomplètes, du Ministère des Travaux Publics. D'après ces statistiques, la pointe générale serait, en chiffres ronds, de 4 000 000 kW pour 18 milliards de kWh. Ce résultat est assez surprenant, bien que des compensations importantes puissent se produire, les courbes de charge des réseaux industriels du Nord étant tout à fait différentes de celles des réseaux du Midi.

Dans presque tous les réseaux de distribution, on constate

que le facteur de pointe a une valeur de l'ordre de 4 à 5 dans les installations peu importantes, de 3 à 3,5 dans les réseaux d'éclairage et de force des grandes villes, de 2,5 à 3 dans les groupes de centrales alimentant les grandes agglomérations entourant et comprenant les grandes capitales, de 1,5 à 2 pour les grands réseaux nationaux. D'une façon générale, on peut dire que l'« utilisation » est relativement faible pour les services d'éclairage (1 000 à 1 500 h) et relativement forte pour les services de traction (4 000 à 6 000 h), suivant l'étendue des lignes électrifiées.

Dans l'industrie électrique, on s'est préoccupé depuis longtemps de régulariser la forme de la courbe de charge. Ce résultat peut être obtenu de deux manières différentes, soit en incitant les abonnés normaux à consommer de l'énergie à certaines heures de la journée de préférence à d'autres par des aménagements de tarifs ou par application de pénalités, soit en créant des abonnés spéciaux dont les courbes de charge pourront être réglées de manière à utiliser aussi complètement que possible les disponibilités des réseaux électriques. Certaines industries chimiques saisonnières peuvent jouer ce rôle dans bien des cas.

Les distributions de vapeur faites à partir des grandes centrales thermiques jouent un rôle compensateur analogue, les besoins de chaleur étant particulièrement intenses de nuit, c'est-à-dire pendant les périodes des faibles charges électriques.

Vers l'interconnexion continentale

L'interconnexion en cours de réalisation dans tous les grands pays du monde est effectuée en utilisant une forme d'énergie électrique unifiée, savoir la forme alternative triphasée.

Cette forme joue dans l'organisation collective des transferts d'énergie le même rôle que la monnaie dans l'organisation commerciale d'un pays. Le mécanisme de l'interconnexion serait profondément modifié si la forme unifiée du courant de transfert était changée. Dès maintenant le continent européen et les pays méditerranéens de l'Afrique et de l'Asie utilisent le courant triphasé à 50 périodes par seconde,

alors que l'Amérique a adopté le triphasé à 60 périodes par seconde.

Il y a lieu de noter à ce sujet que la propagation de l'énergie en courant alternatif, aussi bien le long des conducteurs que dans l'espace libre, s'effectue par ondes, avec une vitesse de l'ordre de celle de la lumière. L'intensité et la tension subissent le long des lignes des fluctuations périodiques. La longueur d'onde atteint 6 000 km pour les courants industriels à 50 périodes par seconde, et 5 000 km pour les courants à 60 périodes. Par suite des phénomènes inhérents à ces variations, résultant en particulier des effets de self induction et de capacité, le transfert d'énergie ne peut guère être effectué sans complications à des distances supérieures à 600 ou 500 km suivant qu'il s'agit de courants à 50 ou 60 périodes par seconde. Si les distances à franchir sans relais sont beaucoup plus grandes, on sera amené à envisager une réduction de la fréquence, : à la fréquence de 15 périodes par seconde correspond une longueur d'onde de 20 000 km, et les possibilités de transport d'énergie à 2 000 km sont, pour cette fréquence, les mêmes qu'à 600 km pour la fréquence 50.

Avec le courant continu, les difficultés qu'entraîne l'emploi des courants alternatifs disparaissent et c'est là un des avantages les plus importants de la transmission à fréquence nulle et à longueur d'onde infinie.

L'emploi d'une fréquence de l'ordre de 15 périodes par seconde a été proposé notamment pour le transfert de l'énergie de Laponie en Allemagne, ou de la Cordillère des Andes au Brésil, pour des distances de 1 200 ou 1 500 km.

Dans le cas de l'Europe, une interconnexion très étendue présenterait des avantages certains aux deux points de vue que nous avons évoqués tout à l'heure.

Une compensation se produirait d'abord entre les divers centres de production. Une interconnexion électrique entre les forces hydrauliques alpines, qui atteignent leur maximum en été par suite de la fonte des neiges, et les usines hydrauliques de Laponie, du Danube, du Massif Central français, où la puissance disponible est maximum en hiver par suite de la chute des pluies, donnerait lieu à une compensation qui nous permettrait, non seulement de retarder la construction de grands barrages accumulateurs, mais encore d'ajourner la mise en chantier d'usines thermiques de grande puissance. L'interconnexion permettrait également d'utiliser des chutes non encore aménagées faute de centres de consommation voisins. Les calculs de M. Oliven (Conférence Mondiale de l'Energie de 1930) montrent que la puissance hydraulique utilisable en Europe dépassera 5 millions de kW dans un avenir assez rapproché et font ressortir les avan-

tages que procurerait une interconnexion européenne.

Ce qui vient d'être dit au sujet des forces hydrauliques s'appliquerait sans changement aux usines thermiques utilisant le pétrole de Galicie, de Roumanie, du Caucase, ou bien le charbon de la Russie méridionale.

Mais la compensation envisagée entre les centres de production se produirait aussi entre les centres de consommation du fait du décalage normal des conditions humaines de travail. Le continent européen s'étend sur des régions entre lesquelles existe une différence de temps solaire d'environ 4 h 30, puisque du Portugal à l'Oural on compte environ 70 degrés de longitude, soit près de 4,5 fuseaux horaires de 15°. La superposition des courbes de charge de pays dont toute la vie industrielle, commerciale, domestique est décalée dans le temps d'une ou plusieurs heures, comme cela se produit pour l'Europe occidentale, l'Europe centrale et l'Europe orientale, aurait pour conséquence une diminution très sensible du facteur de pointe envisagé pour l'ensemble des réseaux, et par conséquent une amélioration de leur « utilisation annuelle », source d'économie considérable pour chacun des participants.

La décroissance du facteur de pointe correspondant à l'extension des réseaux est un phénomène général que l'on constate dans toutes les organisations collectives, et il semble possible d'établir une théorie de la régularisation des courbes de demande d'un produit quelconque avec l'extension du marché de ce produit.

Cette théorie semble pouvoir être ébauchée par application des règles du calcul des probabilités en suivant les méthodes appliquées à l'analyse des phénomènes bancaires : les super-réseaux de distribution d'énergie électrique constituent en effet de véritables banques d'énergie, soumises à des règles d'échange d'énergie analogues à celles des transferts de valeurs, bien que plus simples.

Un industriel possédant par exemple un réseau à Marseille et un autre à Nantes peut échanger de l'énergie entre ces deux villes par l'intermédiaire du réseau national d'interconnexion, étant entendu que ce ne seront pas les kilowatt-heures mêmes déposés à Nantes qui seront délivrés à Marseille, mais une quantité équivalente (compte tenu des pertes) provenant effectivement d'autres sources d'énergie.

Les avantages procurés par l'interconnexion sont analogues à ceux que l'on recueille dans toutes les branches de l'activité humaine, du fait de la concentration de la production qui permet l'exécution d'un travail quelconque en grande série.

H. PARODI.

6

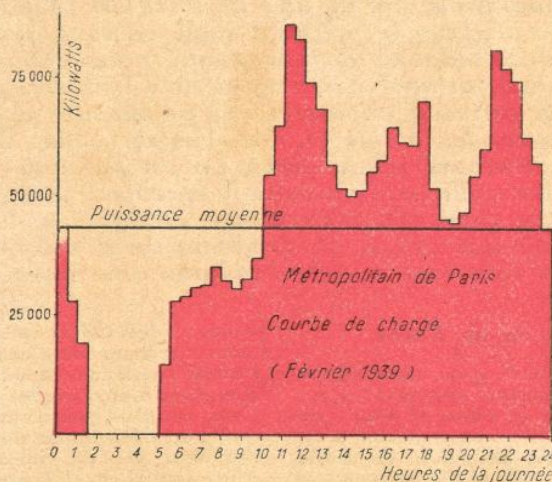


FIG. 12. — EXEMPLE D'UNE COURBE DE CHARGE DU MÉTROPOLITAIN DE PARIS EN FÉVRIER 1939 (FACTEUR DE POINTE : 2)

LES DIMENSIONS DE L'UNIVERS

par Charles FABRY
de l'Académie des Sciences

Les distances qui nous séparent des astres, même les plus proches, sont énormes par rapport à celles que l'homme peut réellement parcourir. Les milliards de myriamètres, les milliers d'années-lumière sont cependant de petites distances considérées à l'échelle astronomique. Mais dire qu'une distance est grande n'a, pour l'homme de science, qu'un sens bien vague; ce qu'il faut, ce sont des nombres. Comment a-t-on pu mesurer les formidables distances qui nous séparent des astres, jusqu'aux plus lointains qui forment ces confins de l'Univers? Par une longue suite d'efforts, l'homme est arrivé à comparer ces immensités avec les unités banales qui lui servent à mesurer les objets qu'il a sous ses yeux. De proche en proche, et par des méthodes toujours renouvelées, on est parvenu jusqu'à des distances que la lumière met des millions de siècles à parcourir. Il y a bien une part d'hypothèse et d'incertitude dans ces évaluations formidables; il est cependant beau que l'on ait pu obtenir des ordres de grandeur sur des dimensions qui dépassent de si loin tout ce que l'homme peut imaginer.

Les dimensions de la Terre

A QUOI bon en parler? dira sans doute le lecteur déjà instruit des choses de l'astronomie; c'est si petit. Il s'agit de l'Univers, et vous allez nous parler d'un grain de sable! Oui, mais ce grain de sable est notre point de départ, ses dimensions nous serviront de base, et si nous ne les connaissions pas nous ne saurions rien. Et d'ailleurs, il n'y a pas si longtemps que ces dimensions sont exactement connues.

Ce fut une longue histoire que celle de l'homme explorant son domaine, la Terre, et le mesurant; elle est liée à la découverte des mers et des continents, et cela est bien près de nous. Rappelons que, lorsque Christophe Colomb aborda, en 1492, sur une île proche du continent américain, il se crut en Asie, qu'au commencement du dix-septième siècle on attribuait à la Méditerranée une longueur trop grande d'un tiers, et qu'au milieu du « grand siècle », les dimensions même de la France étaient très mal connues. A ces problèmes de la science que nous appelons aujourd'hui la *géodésie* se rattachent ceux d'une autre science, la *métrologie*, qui doit d'abord fixer avec précision la définition des unités, et en particulier celle de l'unité de longueur, qui était encore très mal définie en France au dix-septième siècle et ne le fut vraiment bien qu'avec la fondation du « système métrique ». Il n'y a plus, de ce côté, aucune inquiétude à avoir : quand on parle du *mètre*, et par suite du *kilomètre* ou d'un nombre quelconque de kilomètres, il s'agit de quantités définies avec une précision qui dépasse de beaucoup les besoins de la géodésie et de l'astronomie.

Mais comment passer de l'unité métrique banale au diamètre ou à la circonférence de la Terre, déjà trop grande pour qu'on puisse y porter pas à pas un ruban gradué? Sans entrer dans le détail, la méthode est simple. Supposons que nous voulions faire le plan d'un

champ. S'il faut seulement un plan correct, sans s'occuper de l'échelle, on n'a que faire de l'unité métrique; il suffit de faire des mesures d'angles, deux angles si le champ est triangulaire, un plus grand nombre si c'est un polygone que l'on décompose en triangles. Il suffit qu'une longueur ait été mesurée, par exemple celle d'un côté d'un des triangles, pour que l'échelle soit connue, et que par suite on puisse déterminer toutes les longueurs. En somme, tout se réduit à des mesures d'angles et à la mesure sur le terrain d'une *base*. Il en est de même pour la mesure de la Terre, avec cette complication que la figure que l'on mesure n'est pas tracée sur un plan, mais l'opération comprend les mêmes éléments : 1° mesures d'angles, et comme ces angles sont ceux de triangles dont les sommets sont marqués par des repères sur le terrain, cette opération s'appelle *triangulation*; 2° mesure d'une *base*, d'une dizaine de kilomètres de long, dont les extrémités font partie de la série des triangles. C'est par cette opération de *mesure de base* que la géodésie se rattache à la métrologie, et comme le diamètre de la Terre servira à son tour de base initiale dans toutes les mesures astronomiques, c'est par là que la métrologie domine toute l'Astronomie.

Pour passer des mesures géodésiques aux dimensions de la Terre, des observations astronomiques sont nécessaires. Les extrémités de la « triangulation » sont, par exemple, sur un même méridien; mais quelle fraction du méridien a-t-on ainsi mesurée? On l'apprend par la mesure des hauteurs de l'étoile polaire (ou plus exactement du point du ciel qui marque le pôle céleste) au-dessus de l'horizon.

Le résultat est bien connu : le quart du méridien terrestre, (distance du pôle à l'équateur par le plus court chemin) est à très peu près 10 000 kilomètres (plus exactement 10 002 kilomètres). On sait que les fondateurs du système métrique auraient voulu, quand ils ont défini le mètre, que ce nombre fût exactement 10 000;

ils n'y avaient, en somme, pas trop mal réussi. Le diamètre équatorial (distance en ligne droite d'un point de l'équateur à son antipode) est de 12 757 km. C'est bien peu de chose. Un avion rapide couvrirait cette distance en 24 heures s'il pouvait voler aussi longtemps sans arrêt.

Les parallaxes, révélatrices des distances

C'est sur ce tout petit espace, sur ce grain de sable, qu'il faut prendre son vol pour conquérir le monde, du moins pour en mesurer les dimensions. De quoi disposons-nous pour cela?

Notre œil, même armé des plus puissants instruments, ne peut nous donner aucune indication sur les distances des objets éloignés, si nous n'avons par avance aucune indication sur ces objets. Nous ne voyons, du monde extérieur, qu'une projection où les distances ne sont pas marquées; nous ne percevons que des positions apparentes, où les emplacements des différents points s'expriment par des angles, non par des distances. Naturellement si nous connaissons d'avance ou si nous croyons connaître les dimensions de certains objets, leurs diamètres apparents nous donnent une indication intuitive sur leur distance. Mais rien d'analogue n'existe pour les astres. Nous voyons chaque étoile comme un point: rien n'indique que ces points se trouvent à des distances différentes, d'où cette métaphore poétique des clous d'or plantés dans la sphère céleste.

Sommes-nous donc entièrement désarmés? Non, à la condition d'avoir deux observateurs, ou un seul qui se déplace, pour examiner les mêmes objets. Inégalement éloignés, ils semblent alors se déplacer l'un par rapport à l'autre, ce que l'on exprime en disant qu'il y a un effet de parallaxe, et sous ce mot rébarbatif se cache une chose très simple. Si on regarde un objet rapproché, par exemple un poteau télégraphique placé à une certaine distance de mètres, qui se projette sur un fond lointain, et si on remue la tête, on voit l'objet se déplacer par rapport au fond, et le déplacement est d'autant plus marqué que l'objet examiné est plus rapproché. De même, deux observateurs différents placés à une certaine distance l'un de

l'autre ne voient pas l'objet rapproché se projeter au même point de l'horizon, et là encore le déplacement apparent est d'autant plus grand que l'objet est plus proche. C'est ce que précise la figure 1, où le point rapproché est en M, et le fond de tableau, beaucoup plus éloigné que ne l'indique la figure, en P. L'observateur se placera successivement en A et en B; la distance AB sera la base servant à faire l'expérience. Quand l'observateur est en A, il voit le point M se projeter en a; il le voit en b quand il est en B. Par rapport à un repère fixe c,

on peut mesurer le déplacement angulaire apparent, égal à l'angle AMB; c'est l'angle sous lequel, du point M, on voit la base AB; c'est cet angle qui s'appelle la parallaxe de M pour la base AB. Si on mesure cet angle, un calcul élémentaire fera connaître la distance à laquelle se trouve le point M. Il faut, naturellement, proportionner la longueur de la base à la distance qu'il s'agit de mesurer.

La méthode des parallaxes est à la base de toutes les méthodes géométriques pour évaluer les distances. Le « relief stéréoscopique », qui nous donne une indication des distances, et par suite du relief, jusqu'à quelques centaines de mètres, tient à ce que nous avons deux yeux, et que les deux images ne sont pas identiques: question de parallaxes, avec une base de 6 cm environ. C'est encore la parallaxe que l'on utilise dans les télémètres, mais avec une base de quelques mètres. C'est encore la mesure de parallaxes qui va nous révéler les dimensions de notre système planétaire, microcosme dans l'Univers. La base sera la distance entre deux observatoires aussi éloignés qu'il se peut sans sortir de notre Terre.

Commençons par le cas le plus facile, celui de la Lune, le plus facile à cause de sa relativement faible distance. L'observation banale, sans aucune mesure, montre que la Lune est, plus proche de nous que toutes les étoiles et toutes les planètes, puisqu'elle occulte toutes celles qu'elle rencontre sur sa route, plus proche aussi que le Soleil, qu'elle peut éclipser. Et c'est tout ce qu'un observateur isolé peut trouver. Pour évaluer les distances, il suffit de combiner les observations faites, au même instant, en deux stations aussi éloignées que pos-

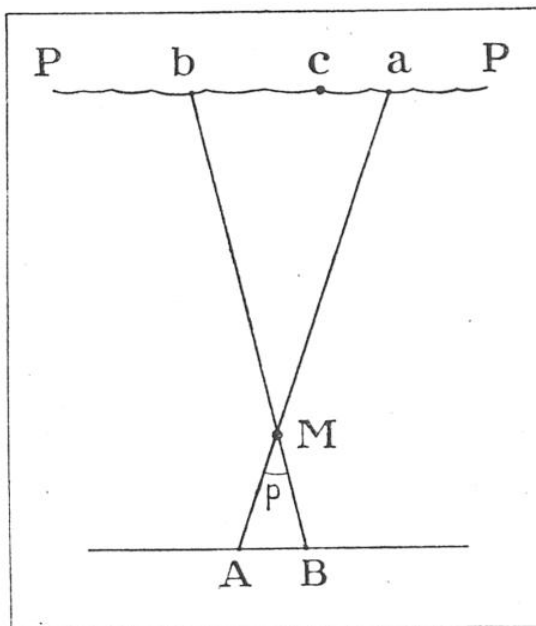


FIG. 1. — EXPLICATION GÉOMÉTRIQUE DU PHÉNOMÈNE DES PARALLAXES

Quand un observateur se déplace, les objets rapprochés lui semblent se déplacer par rapport au fond éloigné. L'objet rapproché est en M, situé par exemple à 100 mètres de l'observateur qui est successivement en A et en B. Le plan P est le fond du paysage, situé très loin, beaucoup plus loin que ne l'indique la figure. L'objet M se projette en a ou en b suivant que l'observateur est en A ou en B; c'est un effet de parallaxe, qui est mesuré par l'angle aMb, ou AMB. C'est l'angle sous lequel, du point M, on voit la base AB. On peut le mesurer en repérant successivement les deux positions apparentes de M par rapport à un point fixe c du fond. Si la parallaxe a été mesurée, on en déduit facilement la distance de l'objet M à la base AB. En astronomie, le fond est représenté par les étoiles lointaines, qui peuvent être regardées comme étant à l'infini. Il faut, dans la mesure du possible, choisir une base d'autant plus grande que l'objet étudié M est plus loin.

sible l'une de l'autre. Expliquons cela sur un exemple. Choisissons comme observatoires celui de Varsovie et celui du Cap de Bonne-Espérance. Leur distance, en ligne droite est de 0 000 km; ils sont à peu près sur le même méridien, par environ 20° de longitude Est de Greenwich; l'heure locale y est sensiblement la même et les astres y passent au méridien à peu près au même instant. Dans la nuit du 11 au 12 décembre 1743 la Lune, presque pleine, se voit dans la constellation du Taureau, non loin de la belle étoile rouge Aldébaran. Sur la carte céleste ci-jointe (fig. 2) on voit cette étoile, ainsi que le groupe des Hyades dessinant la forme d'un V incliné. Dans les deux stations, la Lune n'occupe pas la même situation parmi les étoiles; on a marqué en V la position de la Lune vue de Varsovie à minuit de Greenwich, et en C la Lune vue du Cap à la même heure. La ligne oblique marquée à partir du centre de chacune montre la direction de son déplacement parmi les étoiles. On voit que les deux images ne sont pas à la même place par rapport aux étoiles; la mesure de leur écartement angulaire permet de calculer la « parallaxe » de la Lune, angle sous lequel un observateur placé au centre de la Lune verrait le demi-diamètre équatorial de la Terre; par un calcul facile on en déduit la distance entre les centres de la Terre et de la Lune.

Cette mesure a été répétée bien des fois. Connaissant le rayon de la Terre (et c'est par là que la métrologie s'introduit à la base de l'astronomie), on trouve que la distance entre les centres des deux astres est, en moyenne, 60 fois le rayon terrestre, ou 390 000 kilomètres. C'est, à l'échelle astronomique, une distance extrêmement faible : la lumière la parcourt en un peu plus d'une seconde (plus exactement 1,28 seconde); l'avion rapide dont nous parlions tout à l'heure ferait le voyage en 30 jours.

Les dimensions du système planétaire

La distance de la Lune à la Terre est d'un médiocre intérêt pour la mesure de l'Univers; cette distance ne nous fournit aucune nouvelle base pour la mesure des grandes distances, que nous n'avons pas encore abordée.

D'une bien autre difficulté est la mesure des distances dans le système planétaire, formé du roi Soleil et de ses satellites dont notre Terre est celui qui nous intéresse le plus directement; la distance moyenne de la Terre au Soleil sera la distance fondamentale du système. Son intérêt vient de ce que le diamètre de l'orbite terrestre fournira une base autrement grande que le diamètre de la Terre, à tel point que la distance de la Terre au Soleil est souvent appelée « l'unité astronomique de distance ». Comment la mesurer?

Une seule méthode directe intervient : mesurer la *parallaxe solaire*, c'est-à-dire l'angle sous lequel, du centre du Soleil, on verrait le rayon terrestre. Mais cet angle est très petit, et la mesure directe, facile pour la Lune, est impraticable pour le Soleil, que l'on ne peut observer en même temps que les étoiles qui l'entourent dans le ciel. Heureusement, les lois de la mécanique céleste conduisent à des relations entre les orbites de deux planètes quelconques. Par des observations faciles on peut déterminer avec une haute précision la durée de la révolution des diverses planètes autour du Soleil; les relations auxquelles je fais allusion permettent d'en déduire les rapports des distances au

Soleil. Par exemple, la Terre fait sa révolution en un an, et Jupiter en 11,86 ans; la troisième loi de Képler permet d'en conclure que la distance moyenne du Soleil à Jupiter est 5,20 fois plus grande que celle de la Terre. Procédant d'une manière analogue pour toutes les planètes, on peut tracer une carte correcte de toutes les orbites, mais sans en connaître l'échelle, dès lors, la mesure d'une distance, n'importe laquelle, permet de tout mettre « à l'échelle », et par suite de connaître toutes les distances. C'est par une mesure de la distance d'une planète à la Terre que le problème sera résolu, et cela se fera encore par une mesure de parallaxe.

Mais quelle planète choisir, et à quel moment l'observer? Évidemment la plus proche de nous et, autant que possible, au moment où sa distance est minimum. On crut pendant longtemps que l'observation de Vénus lors d'un de ses passages devant le Soleil, observation faite en des lieux aussi éloignés que possible les uns des autres, donnerait la solution idéale, on fut loin d'atteindre la précision espérée, mais ce fut l'occasion, pour les astronomes, de longs et instructifs voyages pour l'observation des « passages de Vénus », phénomène d'ailleurs très rare, car il n'y en a eu que cinq depuis l'invention des lunettes, le dernier en 1882; le prochain aura lieu le 7 juin 2004, dans 60 ans et quelques mois. On s'est aperçu que l'on pouvait obtenir d'aussi bons résultats, à moins de frais, en observant la planète Mars quand elle est à sa distance minimum, et beaucoup mieux depuis la découverte d'une « petite planète », que l'on a dénommée Eros, découverte faite en 1898. Cette très petite planète (son diamètre n'excède probablement pas 40 km) passe, de temps en temps, à une relativement petite distance de la Terre, le minimum étant environ 1/6 de la distance de la Terre au Soleil. Depuis sa découverte, des conditions favorables se sont présentées deux fois, en 1900-1901 et en 1930-1931; les deux fois, presque tous les observatoires du monde s'entendirent pour observer Eros, afin d'en mesurer la distance. Le principe est le même que celui indiqué plus haut pour la mesure de la distance de la Lune, mais, d'une part, la planète se présente, dans les plus puissants instruments, comme un simple point (ce qui est loin d'être un inconvénient) et, d'autre part, la planète étant beaucoup plus éloignée que la Lune, le déplacement apparent est beaucoup plus faible. A l'échelle de la figure 2, il ne dépasse pas, dans les conditions les plus favorables, 0,1 mm. On conçoit que la mesure précise soit difficile.

Finalement, la distance moyenne de la Terre au Soleil se trouve mesurée avec une très bonne précision. En gros, elle est de 23 400 fois le rayon du globe terrestre, ou 150 millions de kilomètres. C'est une grande distance à l'échelle humaine; l'avion rapide dont nous avons déjà parlé mettrait 30 ans pour parcourir cette distance, mais la lumière la parcourt en 8 minutes. A l'échelle astronomique c'est une très petite distance; la distance qui nous sépare de l'étoile la plus proche est 260 000 fois plus grande. C'est cet énorme saut qu'il nous faut faire pour passer du monde planétaire au monde stellaire afin de poursuivre notre voyage vers les limites de l'Univers.

La distance des étoiles les plus proches

C'est encore la méthode des parallaxes qui

va entrer en action, avec comme base le diamètre de l'orbite terrestre, base de 300 millions de kilomètres. Il ne peut être question de placer, au même instant, un observateur à chaque extrémité de cette base, comme nous le faisons quand la base est purement terrestre; c'est le même observateur qui, à six mois d'intervalle, fera les observations; le voyage se fait tout seul.

Supposons une étoile relativement proche, derrière laquelle se trouvent, comme fond de tableau, de nombreuses étoiles très éloignées, si lointaines que le mouvement de la Terre n'ait aucune action sur leurs positions apparentes. Que verra-t-on au cours d'une année d'observation? L'étoile proche aura un léger balancement autour d'une position moyenne, dû à la parallaxe; la demi-distance des positions extrêmes est l'angle sous lequel un observateur placé sur l'étoile verrait les 150 millions de kilomètres qui représentent la distance de la Terre au Soleil, angle appelé *parallaxe annuelle*, ou simplement *parallaxe* de l'étoile. Si l'on mesure cet angle, un calcul facile donnera la distance de l'étoile en *unités astronomiques*, l'unité astronomique étant la distance de la Terre au Soleil, et ensuite, par une simple multiplication, la distance en kilomètres, si l'on juge utile de se servir de cette unité, ridiculement petite pour les usages astronomiques.

L'idée de mesurer ainsi la distance des étoiles est fort ancienne; les essais ont, pendant longtemps, conduit à des succès; les parallaxes étaient trop petites pour être mesurées. C'est ce qu'exprime le nom d'étoiles fixes, donné aux étoiles par opposition aux planètes. C'est seulement en 1835 que l'on commença à trouver quelques parallaxes, toutes inférieures à 1'', et considérées comme fort incertaines (1). Les ob-

servations étaient faites visuellement (à cette époque les astronomes n'avaient que leurs yeux pour voir) en déterminant les variations, au cours d'une année, de la distance apparente de l'étoile étudiée aux petites étoiles voisines. Peu à peu d'autres étoiles étaient mesurées, mais les parallaxes inférieures à 0'',1 étaient considé-

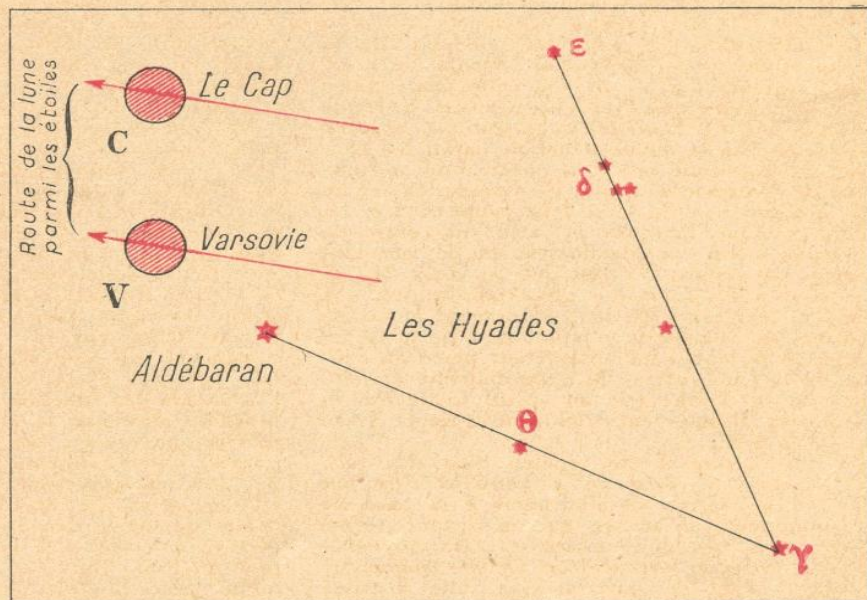


FIG. 2.— LA PARALLAXE DE LA LUNE

Des observateurs placés en divers points de la Terre et regardant la Lune au même instant ne la voient pas à la même place parmi les étoiles. La figure représente une portion de la constellation du Taureau (Aldebaran et le groupe des Hyades), avec la position de la Lune vue au même moment, dans la nuit du 11 au 12 décembre 1943 (pleine Lune), à minuit de Greenwich, et cela pour deux positions de l'observateur, à Varsovie et au Cap de Bonne-Espérance. On voit que, par effet de parallaxe, les deux positions apparentes diffèrent considérablement; le déplacement apparent dépasse le diamètre apparent de la Lune. Si, dans les deux observations, on détermine simultanément la position de la Lune par rapport aux étoiles, on peut en déduire la distance de la Terre à la Lune, si l'on suppose connus le diamètre de la Terre, ainsi que les positions des deux observateurs sur la Terre.

rées comme à peu près inaccessibles. La situation s'est complètement modifiée (comme presque toutes les questions d'astrophysique) par l'emploi de la photographie. Au cours d'une année, on prend, de temps en temps, une photographie de la région du ciel étudiée; c'est sur ces images que l'on mesure les distances angulaires et que l'on étudie leurs variations. On peut ainsi mesurer des parallaxes jusqu'à 0'',01, ce qui a décuplé les distances accessibles à nos mesures. Ce sont des recherches, qui se continuent activement, qui exigent beaucoup de patience et de soins, avec de très bons instruments. Voyons quels sont les résultats.

Le but final est de connaître les distances du plus grand nombre possible d'étoiles. La méthode des parallaxes (souvent appelée « méthode trigonométrique ») est la seule qui donne

apparent d'un objet de 1 mètre placé à 200 km de l'observateur. Les astronomes parlent souvent du centième et même du millième de seconde; cette dernière quantité est le diamètre apparent d'un objet de 1 millimètre placé à 200 km, ou d'un objet de 2 mètres placé à la surface de la Lune et vu de la Terre.

(1) Il est nécessaire de s'habituer aux unités employées pour la mesure des petits angles. Bien que la mesure des angles soit une question classique, on nous permettra de rappeler les unités employées. Les astronomes sont restés fidèles à la division sexagésimale des angles, tandis qu'en France les géodésiens ont adopté la division centésimale, beaucoup plus commode. Dans la division sexagésimale, l'angle droit est divisé en 90 parties appelées degrés (par abréviation, 90°), le degré en 60 minutes (60') et la minute en 60 secondes (60''). Il y a donc 324 000 secondes dans un angle droit. Dans la mesure des parallaxes stellaires, c'est la seconde qui revient constamment. La seconde est à peu près le diamètre

directement la distance, sans aucune hypothèse sur la grosseur ni sur le rayonnement de l'étoile étudiée; c'est, au contraire, de la distance directement mesurée que l'on pourra déduire quelque chose sur ce qu'est réellement une étoile; la mesure trigonométrique est à la base de toute l'astronomie stellaire. On connaît actuellement les distances directement mesurées de quelque 5 000 étoiles. Ce qu'il faut de précision dans ces mesures est illustré par le fait suivant : supposons qu'on se serve d'une lunette de 20 m de long (c'est le cas pour la lunette de l'observatoire Yerkes, la plus puissante du monde). L'image d'une étoile avant une parallaxe de $0''.01$ subira, au cours d'une année, un balancement dont l'amplitude totale n'est que de $0^{mm}.002$ (ou 2 microns). C'est sur la mesure de ce minuscule déplacement que repose la détermination de la distance.

Ces distances, avec quelle unité les exprimer? Le kilomètre est une unité ridiculement petite, et il en est de même de la distance de la Terre au Soleil. Le résultat brut de la mesure est la parallaxe, mais c'est un nombre d'autant plus petit que la distance est plus grande; c'est l'inverse de la parallaxe qui mesure la distance. C'est ce que les astronomes se sont décidés à faire. Ils prennent comme unité de distance celle d'une étoile dont la parallaxe est de 1 seconde ($1''$), et à cette unité ils ont donné le nom de *parsec*. Les nombres suivants la rattachent aux unités déjà connues :

1 parsec = 23 400 fois la distance de la Terre au Soleil = $3,08 \times 10^{13}$ km.

Une étoile dont la parallaxe est $0''.01$ est à la distance de 100 parsecs.

Un autre mode d'expression souvent employé consiste à représenter la distance par le temps que met sa lumière à nous parvenir. Connaissant la vitesse de la lumière (300 000 km par seconde), le calcul est facile. On trouve que 1 parsec = 3,26 années-lumière. Les étoiles les plus lointaines mesurées par la méthode trigonométrique nous envoient leur lumière en 300 ans environ. C'est là que se bornent les mesures directes, d'où toute hypothèse est absente. Pour parcourir les énormes distances qui nous restent à franchir, qui vont jusqu'à des millions d'années-lumière, une certaine part d'hypothèse, l'emploi parfois du vraisemblable au lieu du certain, sera nécessaire.

Les mouvements des « étoiles fixes » révèlent leurs distances

Pour la grande majorité des étoiles, la parallaxe annuelle n'existe pratiquement pas; tout ce que l'on peut dire, c'est que leur lumière met au moins un millier d'années pour nous parvenir. La distance de la Terre au Soleil est une base beaucoup trop petite pour mesurer leur distance. Ce n'est pas une raison pour que ces étoiles soient immobiles les unes par rapport aux autres, et en particulier par rapport au Soleil. En laissant passer les années, et même les siècles (quand on aura des siècles d'observations précises) on trouvera des déplacements relatifs parfois très appréciables. On les appelle « mouvements propres » des étoiles. On les exprime en secondes d'angle par an, ou par siècle. Pour quelques étoiles, peu nombreuses, ces « mouvements propres » sont relativement grands : pour une étoile de neuvième grandeur découverte par Barnard, le déplacement apparent atteint $10''.27$ par an; en 180 ans elle parcourt le diamètre apparent de la Lune. La belle

étoile Procyon (*alpha* du Petit Chien) a un mouvement beaucoup plus lent, mais encore considérable sur de longues périodes : dans 70 000 ans, elle aura pris à peu près la place actuellement occupée par Sirius, qui aura lui-même émigré vers le Sud.

L'étude détaillée de ces « mouvements propres », qui devra comprendre des millions d'étoiles, étude qui n'est sérieusement commencée que depuis quelques dizaines d'années, sera un travail énorme, où le temps est nécessaire pour que les petits déplacements s'accumulent et deviennent appréciables. Il est dès à présent certain que pour des milliards d'étoiles les déplacements sont insensibles; elles sont trop loin pour que leurs déplacements réels produisent un effet appréciable même dans un temps très long. De l'ensemble des mesures actuellement faites, ainsi que des mesures de « vitesses radiales » faites par l'étude des spectres, mesures qui portent toutes sur des étoiles relativement proches, il résulte que, dans l'ensemble, il y a une forte proportion de vitesses dans une direction déterminée, qui est évidemment la direction inverse de celle du Soleil par rapport à l'ensemble des étoiles étudiées. Finalement on conclut que le Soleil, par rapport à l'ensemble de ces étoiles, se déplace avec une vitesse d'environ 20 km par seconde vers une région de la constellation de la Lyre, autour de la belle étoile Véga qui brille près du zénith dans les soirées d'été. Les « mouvements propres » que nous observons sont une combinaison de l'effet de perspective qui résulte du mouvement du Soleil, et du véritable mouvement des étoiles par rapport à l'ensemble de leurs congénères.

En tout état de cause, il est évident qu'un grand mouvement propre apparent d'une étoile est une probabilité de faible distance. Quant au calcul de la distance au moyen du mouvement propre mesuré, il n'est possible qu'en faisant une hypothèse sur la grandeur et la direction de la vitesse propre de l'étoile. Mais, en moyenne, ces vitesses sont dirigées au hasard; si on les néglige, on peut commettre une grosse erreur sur la valeur de la distance d'une étoile, mais, en moyenne, les résultats seront corrects. Sur des études de statistiques stellaires, les distances ainsi évaluées pourront rendre des services; très modestement, les astronomes désignent les distances ainsi évaluées sous le nom de « distances hypothétiques ».

On connaît actuellement les mouvements propres d'environ 40 000 étoiles, et on peut en déduire un égal nombre de « distances hypothétiques ». Il ne s'agit de les utiliser que dans les statistiques, et les résultats obtenus sont importants. On trouve, par exemple, que les étoiles de dixième grandeur sont, en moyenne, à une distance de 370 parsecs (1 200 années-lumière) et celles de treizième grandeur à 1 100 parsecs (3 600 années-lumière). Mais il y a de nombreuses exceptions. L'étoile découverte par Barnard et baptisée par lui « Proxima », et qui est en effet la plus proche des étoiles connues (distance 1,3 parsec) n'est qu'une petite étoile télescopique de onzième grandeur; d'après les statistiques elle devrait être à une distance de quelque 500 parsecs. L'anomalie vient de ce que « Proxima » est une étoile naine, dont l'intensité lumineuse est inférieure à 1/10 000 de celle de notre Soleil qui, lui-même, n'est pas parmi les étoiles les plus brillantes. Nous allons retrouver, dans ce qui va suivre, l'éclat des étoiles comme moyen d'évaluer leurs distances.

Les distances évaluées par l'éclat

Regardons à l'œil nu le ciel nocturne. Nous y voyons un grand nombre de points lumineux, qui nous apparaissent avec des éclats très différents. Il y en a de très brillants, déjà bien visibles avant que la nuit ne soit complètement venue, telles Sirius ou Véga. Par une graduation insensiblement décroissante, nous arrivons jusqu'aux étoiles que les meilleures vues aperçoivent tout juste à l'œil nu, série qui se prolonge jusqu'aux étoiles que l'on ne peut voir (ou photographier) qu'en se servant des plus puissants télescopes.

Il y a près de deux mille ans que les astronomes grecs représentèrent les éclats apparents par des chiffres un peu arbitraires que, dans la langue française, on exprima par le mot *grandeur*, puis de nos jours, pour éviter toute confusion, par le terme *magnitude*. Les étoiles les plus brillantes furent dites : de première grandeur (ou de magnitude 1) ; venaient ensuite celles de deuxième, de troisième, jusqu'aux étoiles tout juste visibles à l'œil nu qui sont dites : de sixième grandeur (magnitude 6). Après l'invention des lunettes on prolongea la série par les étoiles de magnitude 6, 7, 8, etc., série d'ailleurs, au début, fort mal définie. Tout ce numérotage était fort arbitraire.

C'est seulement au siècle dernier que l'on commença à faire des mesures photométriques comparant l'énergie du rayonnement que les diverses étoiles envoient sur l'unité de surface placée sur la Terre. Naturellement, on compara les nombres ainsi obtenus avec les « magnitudes » inscrites dans les catalogues d'étoiles et fixées uniquement par l'usage. On trouva que la loi simple était approximativement vérifiée : entre deux étoiles dont les magnitudes diffèrent d'une unité il y a un rapport d'éclat sensiblement constant, et tel qu'un écart de magnitude égal à 5 corresponde à un rapport d'éclat égal à 100.

Une étoile de première grandeur est 100 fois plus brillante qu'une étoile de magnitude 6, juste visible à l'œil nu.

Cette échelle se prolonge tout naturellement

dans les deux sens, sans qu'elle cesse d'être parfaitement définie. Vers les étoiles de moins en moins brillantes, les magnitudes vont en augmentant de plus en plus, jusqu'aux étoiles les plus faibles accessibles aux plus grands télescopes, qui sont actuellement de magnitude 21, limite qui sera encore augmentée quand sera en service le télescope de 5 mètres de dia-

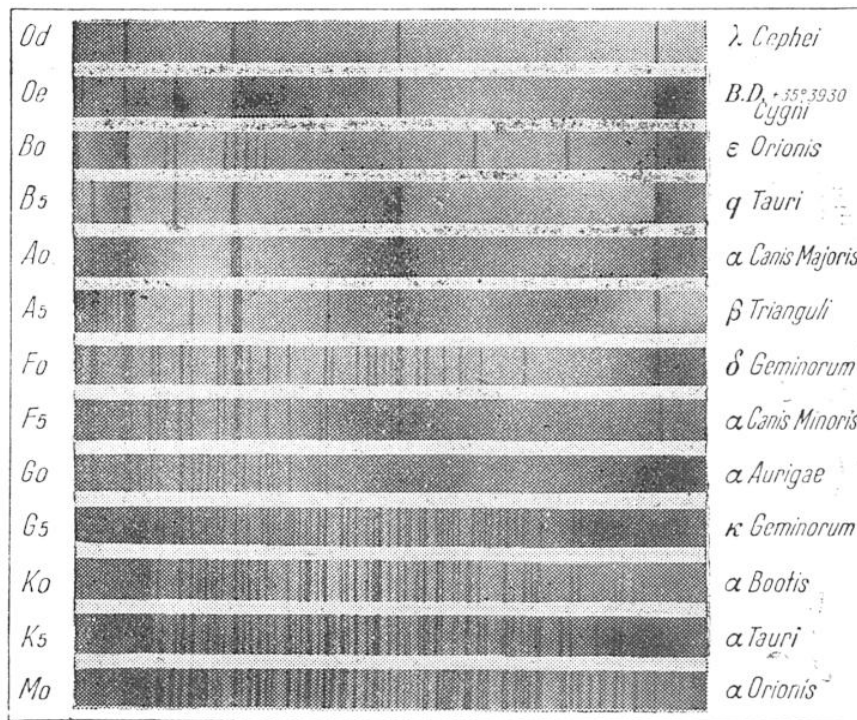


FIG. 3. — TYPES DE SPECTRES D'ÉTOILES

Ces spectres, obtenus tous avec le même spectrographe à prismes, se rapportent à des étoiles typiques de chaque catégorie. Ils comprennent seulement la partie violette jusqu'à la limite de l'ultraviolet (à gauche), l'indigo et le bleu jusqu'à la limite du vert (à droite). Dans les spectres du haut (type O, étoiles à température très élevée), il y a peu de lignes d'absorption, presque uniquement celles de l'hydrogène. A partir de B 5, on voit apparaître, à gauche, les deux raies H et K du calcium ionisé. A partir de F apparaissent des raies métalliques de plus en plus nombreuses, qui deviennent presque innombrables dans le type G (type solaire). A partir du type K apparaissent des bandes d'absorption produites non plus par des atomes, mais par des molécules à l'état de vapeur. Ces bandes finissent par envahir tout le spectre dans le type M, correspondant aux étoiles les moins chaudes. (Figure empruntée à l'Annuaire Flammarion.)

mètre actuellement en construction. Du côté des astres de plus en plus brillants, on continue la série des magnitudes décroissantes (1) ; on arrive à des magnitudes inférieures à 1 (Procyon 0,5), puis négatives : Sirius a la magnitude - 1,6 et Vénus, à son plus grand éclat, atteint la magnitude - 4, ce qui correspond à un éclat 100 fois plus grand que celui de l'étoile de

(1) Les magnitudes décroissent proportionnellement aux logarithmes des éclats, suivant la formule :

$$m = \text{Cte} - 0,4 \log E$$

formule où m est la magnitude d'une étoile et E son éclat. La constante que contient la formule est définie si l'on fixe, une fois pour toutes, la magnitude d'une étoile prise comme « étalon », par exemple si l'on déclare que la magnitude d'Aldébaran est 1.

magnitude 1. Enfin, les mêmes notations s'appliquent aux astres qui ont un diamètre apparent sensible : la magnitude de la pleine Lune est $-12,7$, et celle du Soleil est $-26,7$; le flux lumineux que nous recevons du Soleil est 100 milliards de fois celui qui nous vient d'une étoile de première grandeur (2).

Mais revenons aux étoiles. Les différences d'éclat apparent viennent de deux causes : d'une part les différences d'intensité lumineuse propre des différentes étoiles, d'autre part les différences de distance. Dans le langage des physiciens et des techniciens de l'éclairage, l'éclat absolu d'une étoile indépendamment de sa distance n'est autre chose que son *intensité lumineuse*, qui s'exprime en *bougies*. C'est ainsi que le Soleil est une lampe de 3×10^{27} bougies. Mais les astronomes n'aiment pas beaucoup l'emploi, dans leur science, du langage des physiciens et des commerçants, et ils ont peut-être raison : l'évaluation en bougies de l'éclat absolu d'une étoile serait fort incommode et n'irait pas sans difficultés. Les astronomes préfèrent s'en tenir à leurs *magnitudes*, et dé-

finir ce qu'ils appellent la *magnitude absolue*. C'est la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était ramenée à une distance toujours la même et choisie une fois pour toutes. On a choisi pour cela la distance de 10 parsecs (32,6 années-lumière), qui n'est pas très grande mais n'est cependant pas ridiculement petite (2).

Donnons tout de suite, pour fixer les idées, quelques exemples de magnitude absolue, en insistant sur ce que ces chiffres représentent. Notre Soleil, avec son nombre de bougies qui s'exprime par le chiffre 3 suivi de 27 zéros, est de magnitude absolue 4,8, et se tient dans une honnête moyenne. Sirius, vingt-cinq fois

(1) Il faut s'habituer à cette convention bizarre d'après laquelle les étoiles les plus brillantes ont les « magnitudes » les plus petites, convention qui conduit à représenter par des nombres négatifs les « magnitudes » des astres extrêmement brillants. L'emploi du logarithme de l'éclat pour caractériser la magnitude est tout à fait rationnel, mais on aurait pu ne pas mettre le signe moins dans la formule qui relie la magnitude au logarithme de l'éclat, et ne pas y introduire le facteur arbitraire 0,4. Les astronomes ont voulu rester fidèles à la mémoire des astronomes grecs, et ne pas introduire de solution de continuité dans la manière d'exprimer le résultat de leurs mesures. On ne peut pas le leur reprocher.

(2) En l'absence d'absorption à travers l'espace (hypothèse admissible pour les distances qui ne sont pas parmi les plus grandes), il est facile de calculer la magnitude absolue M si l'on connaît la magnitude apparente m et la distance exprimée en parsecs D . On arrive à la formule très simple :

$$M = m + 5 - 5 \log D.$$

plus brillante, est de magnitude absolue 1,3, dépassée de beaucoup par Canopus, qui ne vient qu'en second dans l'ordre des éclats apparents, et qui atteint la magnitude $-4,8$, ce qui l'égale à 7 000 Soleils. La plus forte étoile connue est une étoile invisible à l'œil nu, de magnitude apparente 8,2, désignée par S Dorade, dans le petit nuage de Magellan (voir plus loin), qui atteint la magnitude absolue $-8,9$, ce qui lui donne un éclat égal à 300 000 fois celui du Soleil; c'est l'énorme distance à laquelle cette étoile se trouve de nous qui la rend si faible en apparence. A l'autre bout de l'échelle, nous trouvons la « Proxima » de Barnard, qui est en effet la plus proche étoile connue. De onzième grandeur apparente, sa magnitude absolue est 15,6, ce qui lui donne un éclat égal à 1/20 000 de celui du Soleil.

La magnitude apparente est relativement facile à mesurer. Cette quantité étant connue, le problème de la distance est subordonné à la connaissance de la magnitude absolue. Il se trouve résolu dans les circonstances suivantes.

Supposons que l'on découvre

une catégorie d'étoiles présentant certaines particularités d'une manière exactement identique. Il peut y avoir de très bonnes raisons pour penser que ces étoiles sont véritablement identiques entre elles, qu'elles sont du même âge, qu'elles ont même masse, même température, même surface rayonnante, que par suite leurs magnitudes absolues sont les mêmes. Leurs différences de magnitude apparente tiennent uniquement à l'inégalité de leurs distances; si l'on connaît les distances de quelques-unes d'entre elles, parmi les plus proches, accessibles aux mesures directes, on peut calculer leurs magnitudes absolues et constater qu'elles sont sensiblement les mêmes, ce qui justifie l'hypothèse faite. La même magnitude absolue s'applique à toutes les étoiles de la même catégorie, même aux plus lointaines; ayant mesuré toutes les magnitudes apparentes, on pourra calculer toutes les distances.

Tel est le principe de la méthode, inaugurée en 1914 par W. S. Adams, actuellement directeur du célèbre observatoire du Mont Wilson, en Californie. Elle se prête à de nombreuses variantes, selon le critérium que l'on adopte pour admettre l'identité des étoiles d'une certaine catégorie.

La parenté entre étoiles, révélée par le spectre

Sur la plupart des étoiles, nous ne savons rien de plus que ce que peut nous apprendre l'analyse de leur lumière. C'est sur l'examen appro-

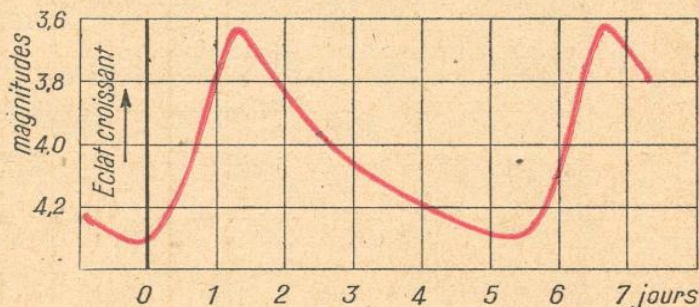


FIG. 4. — COURBE DE L'ÉCLAT DE L'ÉTOILE VARIABLE DELTA DE CÉPHÉE

Cette étoile, facilement observable à l'œil nu, est le prototype des « Céphéides ». Sa période est de 5 jours 9 heures, et la magnitude varie entre 4,4 (éclat minimum) et 3,6 (maximum). A partir du minimum, la montée est très rapide (complète en 1,5 jour) et après le maximum la descente est lente (4 jours environ). Comme toutes les Céphéides, c'est une très grosse étoile, de magnitude absolue $-2,5$ à son maximum (200 fois plus brillante que le Soleil). Elle est située à une distance de 160 parsecs (environ 500 années-lumière).

fondi des spectres qu'est fondée la méthode de W. S. Adams.

L'analyse de la lumière d'un astre, le plus souvent au moyen de prismes, quelquefois, lorsque cela est possible, par la méthode plus puissante des réseaux, permet de dire de quelles radiations simples est composée cette lumière, et quelles sont les radiations qui font défaut parce qu'elles ont été absorbées dans l'atmosphère de l'étoile. Dans l'immense majorité des cas, on trouve un spectre continu, sur lequel se

détachent des lignes sombres, correspondant aux radiations qui ont été absorbées. Un coup d'œil aux photographies des spectres de diverses étoiles (figure 3) montre que les spectres sont très différents; deux étoiles prises au hasard ne se ressemblent pas du tout. Les différences portent à la fois sur la répartition des intensités dans le spectre continu et sur les lignes d'absorption. L'examen de centaines de mille spectres d'étoiles a permis de les classer en une série telle, que l'on passe par une gradation continue d'un type spectral à un autre. Voyons comment se fait cette gradation.

En ce qui concerne le spectre continu, les différences portent sur les intensités relatives des diverses parties du spectre. Considérons deux étoiles d'éclats apparents analogues, mais d'aspect visuel différent, par exemple les deux étoiles d'Orion, Rigel (*alpha* Orion), étoile blanche, et Bételgeuse (*bêta* Orion), fortement rouge par comparaison. Comment se traduit cette différence de couleur dans le langage du spectre? Evidemment par le fait que le spectre de l'étoile rouge est plus riche en radiations rouges, ou plus généralement en radiations de grande longueur d'onde; au contraire la lumière de Rigel est riche en radiations violettes et bleues. C'est bien ce que le spectrographe révèle, et l'on voit que le simple examen visuel permet déjà d'ébaucher une classification spectrale. Ces écarts de composition spectrale font immédiatement penser à des différences de température; tout le monde sait qu'une lampe à incandescence très « poussée » donne une lumière blanche riche en radiations de courte longueur d'onde, tandis qu'une lampe sous-voltée donne une lumière rouge par comparaison; ces différences

de composition de la lumière émise tiennent à ce que dans le premier cas la température du filament est plus élevée que dans le second. Il en est de même pour les étoiles, bien que les températures soient à un niveau beaucoup plus élevé que dans nos sources de lumière artificielles. On aurait pour Rigel une température de, peut-être, 20 000° de l'échelle centésimale ordinaire, d'environ 3 000° pour Bételgeuse, et moins de 2 000° pour certaines étoiles franchement rouges. Notre Soleil, avec ses 6 000°, se

tient dans un juste milieu.

Le nombre, l'aspect de la nature des lignes d'absorption confirment cette classification, mais avec des particularités bien autrement délicates et permettant une classification bien plus serrée.

La fig. 3 montre, sur des exemples typiques, les spectres stellaires qui forment la « série normale », rangés par ordre des températures décroissantes de haut en bas. On les a désignés par des lettres, qui ont été choisis un peu au hasard, à une époque où les connaissances étaient encore embryonnaires, et que l'on a conservées. On trouve ainsi les étoiles de type O, B, A, F, G, K, M. On passe insensiblement

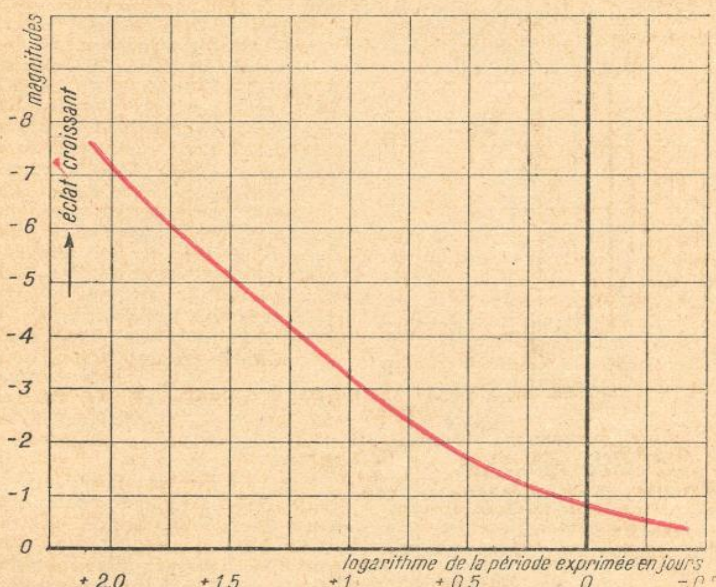


FIG. 5. — COMMENT VARIE LA MAGNITUDE ABSOLUE DES ÉTOILES VARIABLES « CÉPHÉIDES » EN FONCTION DE LEUR PÉRIODE

Dans le groupe des étoiles variables Céphéides, les variations d'éclat sont d'autant plus lentes que l'étoile est plus grosse; une courbe régulière relie l'intensité lumineuse (représentée ici par la magnitude absolue) à la période (représentée par son logarithme). La période varie de 8 heures à 100 jours environ, et la magnitude absolue varie de 7 unités, ou l'intensité lumineuse dans le rapport de 1 à 900 environ. Une fois cette courbe connue, quelques observations photométriques suffisent pour évaluer la distance de l'étoile observée.

d'un type au suivant, de sorte qu'on est conduit à faire, dans chaque type, des subdivisions que l'on exprime par des chiffres. On aura, par exemple, les spectres A0, A1, A2, etc., A9; B0, B1, etc. Dans l'ensemble, de O à M, le nombre des lignes d'absorption augmente. Au début apparaissent surtout des lignes d'atomes ionisés (atomes ayant perdu un ou plusieurs électrons), stables aux très hautes températures, puis prédominent les lignes d'atomes neutres, et enfin apparaissent des bandes d'absorption produites par des molécules composées.

C'est sur les intensités relatives des diverses raies d'absorption que Walter Adams fonda une méthode pour déclarer que certaines étoiles sont de la même famille, et pour chiffrer leur degré de parenté. Par exemple, pour les spectres du type G, auquel appartient le Soleil et qui est une des catégories les plus nombreuses parmi les étoiles, Adams compare les intensités d'une ligne de strontium ionisé et d'une ligne de l'atome de fer neutre. Les deux lignes choisies sont très voisines l'une de l'autre, et

sont situées dans le violet, région spectrale dont l'étude est facile par photographie, et où les prismes donnent une bonne dispersion. Pour un grand nombre d'étoiles dont on connaît, au moins approximativement, la distance et par suite la magnitude absolue, on détermine, simplement au juger, le rapport des intensités des deux lignes. On constate que les étoiles pour lesquelles ce rapport est le même ont bien même magnitude absolue. On peut alors tracer un diagramme où les abscisses sont les valeurs du rapport en question et les ordonnées les magnitudes absolues. Les points se placent bien sur une courbe. Une fois accompli ce travail préliminaire qui justifie le principe de la méthode, la détermination de la distance d'une étoile de la classe G devient facile.

Que faut-il pour cela? Il faut une mesure photométrique, donnant la magnitude apparente; c'est une opération facile, même pour les étoiles les plus lointaines, par comparaison avec les nombreux repères photométriques que l'on a établis dans le ciel. Il faut aussi que l'on puisse obtenir un bon spectrogramme, où les fins détails nécessaires puissent être reconnus. C'est cette opération qui limite l'emploi de la méthode. Avec les moyens dont on dispose actuellement, on peut étudier les étoiles jusqu'à la dixième grandeur, ce qui permettrait d'atteindre environ 150 000 étoiles. On en a étudié environ 10 000, dont les distances vont jusqu'à un millier de parsecs (environ 3 000 années-lumière), et ces distances sont déterminées avec beaucoup plus de certitude et de précision que ne le sont les « distances hypothétiques » déduites des mouvements propres. La méthode trigonométrique nous avait laissé à 300 années-lumière; c'est un nouveau saut de dix fois que nous fait faire la méthode spectroscopique.

Les étoiles variables

Toute particularité d'une étoile, toute marque distinctive, nous donne, en quelque sorte, prise sur elle, et nous fait espérer quelque méthode pour évaluer sa distance. Cet espoir s'est vérifié pour une catégorie remarquable d'étoiles variables. Le spectrographe nous avait laissés en panne vers les 3 000 années-lumière; les étoiles variables du type « Céphéides » vont nous faire pénétrer dans les millions d'années.

Les « variables » sont des étoiles dont l'éclat apparent varie entre des limites plus ou moins étendues. On en connaît 90 qui sont observables à l'œil nu dans nos régions (ce qui exclut une grande partie du ciel austral), mais le nombre des variables télescopiques est immensément plus grand. On en découvre un grand nombre chaque année en comparant des images photographiques d'une même région céleste, prises à des époques différentes. On en connaît actuellement une dizaine de mille, et l'on en découvre des centaines chaque année. Elles se séparent en catégories nettement distinctes par la loi de leur variation et la cause même de ces changements. La plupart de ces changements sont périodiques, c'est-à-dire qu'ils se reproduisent à intervalles réguliers, parfois avec quelques perturbations. L'étude détaillée des étoiles variables, si intéressante qu'elle soit et bien qu'elle révèle sur ces étoiles de remarquables particularités, ne peut trouver place ici. Pour la question qui nous occupe, celle des distances qui nous séparent des étoiles, une seule catégorie de variables nous intéresse, celle des Céphéides, ainsi nommée parce que la plus

brillantes des étoiles de cette catégorie est l'étoile *delta* de la constellation de Céphée, découverte en 1784. C'est une classe fort nombreuse, qui comprend à peu près le quart des variables connues.

Prenons comme exemple cette étoile *delta* Céphée, qui a donné son nom à toute la famille des Céphéides. Sa période, très régulière, est de 5,37 jours. La variation d'éclat apparent est considérable, car la magnitude varie de 3,6 à 4,3; du minimum au maximum l'éclat varie presque dans le rapport de 1 à 2. La figure 4 donne la courbe de variation de la magnitude. On voit que cette courbe n'est pas symétrique : à partir du minimum l'ascension de l'éclat est rapide, le maximum étant atteint en 1,4 jour, tandis que le retour au minimum suivant prend 4 jours. L'étoile subit en même temps de légers changements de couleur : elle est plus rouge au minimum d'éclat ce qui indique une température un peu moins élevée. La théorie de ces curieuses variations d'éclat n'est pas encore complètement élucidée, mais on s'accorde à penser qu'elles ont pour cause une pulsation régulière de la sphère de gaz lumineux qu'est l'étoile, pulsation qui amène des variations de pression, et par suite des changements de température de la surface. Le spectrographe révèle d'ailleurs ces mouvements de la surface qui, autour d'une vitesse moyenne, tantôt s'éloigne et tantôt se rapproche de la Terre. Comme on le verra tout à l'heure, toutes les Céphéides sont d'énormes étoiles, beaucoup plus lumineuses que notre Soleil, mais d'éclat apparent généralement faible à cause de leur énorme distance.

Les milliers d'autres Céphéides que l'on connaît présentent des caractères analogues, mais avec des périodes très différentes, depuis quelques heures jusqu'à un mois. Il est évident que ces diverses périodes dénotent un caractère important des diverses étoiles. L'astronome américain H. Shapley, actuellement directeur de l'observatoire de Harvard College, émit et soumit au contrôle de l'observation une hypothèse très hardie : si deux Céphéides ont même période, elles sont identiques. En particulier, elles brillent de la même façon; elles ont même magnitude absolue, et si elles ont des éclats apparents très différents, c'est uniquement une question de distance. Shapley vérifia son hypothèse sur les Céphéides, malheureusement peu nombreuses, dont on connaît approximativement la distance, et dont on peut par suite calculer la magnitude absolue. Un peu plus tard, Miss Leavitt découvrit un certain nombre de Céphéides dans le grand amas irrégulier connu sous le nom de « petite nuée de Magellan ». Ces étoiles faisant toutes partie de cet amas, qui est situé à une très grande distance, sont sensiblement toutes à la même distance de nous; il y a une différence constante entre leurs magnitudes apparentes, faciles à déterminer, et leurs magnitudes absolues. Sans aucune mesure de distance, on constate une relation régulière entre la période et la magnitude. Les étoiles dont la période est la plus longue sont les plus brillantes et l'on conçoit qu'il en soit ainsi, le mouvement de pulsation étant vraisemblablement plus lent sur une grosse sphère gazeuse que sur une petite. Dans cette même nuée, Shapley observa plus de 200 Céphéides, et arriva aux mêmes conclusions.

Finalement, on peut tracer un diagramme où les abscisses sont les durées de la période et les ordonnées les magnitudes absolues au moment du maximum d'éclat. La figure 5 représente ce

diagramme. Une fois ce résultat obtenu, la détermination de la distance à laquelle se trouve une Céphéide est une opération facile. Il suffit d'en déterminer la période, en la photographiant tous les jours, ou même plusieurs fois par nuit, pour suivre ses variations d'éclat apparent; sur la courbe de Shapley on lit la magnitude absolue. Sur ces mêmes clichés, la mesure de la magnitude apparente est facile, et de ces deux données, magnitudes apparente et absolue, on déduit la distance. La méthode s'applique aux étoiles les plus lointaines qu'il soit possible de photographier.

Insistons sur l'énorme éclat absolu des Céphéides, même de celles qui, à cause de leur distance, ne sont accessibles qu'aux plus puissants télescopes. En valeur absolue, les plus faibles des Céphéides ont la magnitude — 0,2; elles brillent 100 fois plus que le Soleil, et les plus fortes vont jusqu'à la magnitude absolue — 6; elles valent 20 000 Soleils, bien que quelques-unes d'entre elles soient de dix-huitième grandeur apparente.

Les amas globulaires

C'est surtout dans l'étude de ces amas que les Céphéides ont été utiles. Ces remarquables objets célestes se présentent comme des disques à peu près ronds, remplis d'un extraordinaire fourmillement d'étoiles, si serrées dans la partie centrale que les plus puissants télescopes ne peuvent les séparer, et dont la densité apparente va en diminuant vers le bord. On en connaît exactement 103, et il est probable qu'on les connaît tous car, depuis 60 ans, en dépit de l'énorme perfectionnement des moyens d'observation, on en a découvert un seul. Tous apparaissent sous la forme ronde, ce qui indique qu'ils sont sensiblement sphériques. Le plus remarquable de ces amas, dans la constellation d'Hercule, a un diamètre apparent (en y comprenant la partie périphérique où les étoiles sont assez clairsemées) d'environ 30', sensiblement égal au diamètre apparent de la Lune. Il compte environ 40 000 étoiles en dehors de la partie centrale où le dénombrement est impossible; le chiffre total de 100 000 n'est pas invraisemblable. Et encore ne voyons-nous que les étoiles relativement brillantes; notre Soleil, qui n'est pas une étoile géante mais n'est pas une naine, y serait à l'extrême limite de la visibilité dans nos plus puissants instruments.

Dans dix-neuf de ces amas on a découvert des Céphéides, ce qui a permis de calculer leurs distances; pour les autres on a des distances approchées par la mesure photométrique apparente des étoiles les plus brillantes (ou plutôt les moins faibles) auxquelles on attribue la magnitude absolue moyenne des « étoiles géantes ». On arrive finalement à des données au moins approchées sur la distance de ces amas globulaires. Le plus proche, celui de la constellation du Centaure, tout juste visible à l'œil

nu, est à 7 200 parsecs (23 000 années-lumière). L'amas d'Hercule est à 11 000 parsecs (38 000 ans). Toutefois, l'absorption de la lumière dans un trajet aussi long à travers l'espace laisse quelque incertitude sur ces résultats.

Ici s'arrête notre « galaxie », la grande famille stellaire à laquelle appartient notre Soleil et par suite notre Terre. Elle est formée de plus d'un milliard d'étoiles, peut-être quelques dizaines de milliards; cet immense amas, très aplati, qui, dans sa plus grande dimension, peut avoir 30 000 parsecs de diamètre (environ 100 000 années-lumière) et à peu près dix fois moins selon son petit diamètre.

Il faut maintenant quitter ce monde auquel nous appartenons pour nous acheminer vers les millions d'années-lumière.

Le monde extra-galactique, ou le vraiment grand univers

Ce sont des millions d'autres galaxies, analogues à la nôtre, qui forment cet univers extra-galactique. Avant de partir pour en faire

la conquête, arrêtons-nous au relais que forment les « nuées de Magellan », qui sont nettement hors de notre monde galactique. Si l'on compare notre Galaxie à une ville comme Paris, les amas globulaires seraient dans la ville, mais à la périphérie, par exemple à Auteuil ou aux Buttes-Chaumont; les nuées de Magellan sont dans la grande banlieue, disons à Versailles ou Saint-Germain. Les nébuleuses extra-galactiques commenceraient à Lille ou à Dijon, et s'étendraient bien au-delà des limites de la Terre.

Ces « nuées », la grande et la petite, se trouvent dans l'hémisphère céleste austral, et ne sont pas visibles dans nos régions. Elles furent signalées pour la première fois par le grand navigateur portugais Magellan (1470-1521) pendant ses voyages dans les mers du Sud. Ce sont deux taches nébuleuses, bien visibles à l'œil

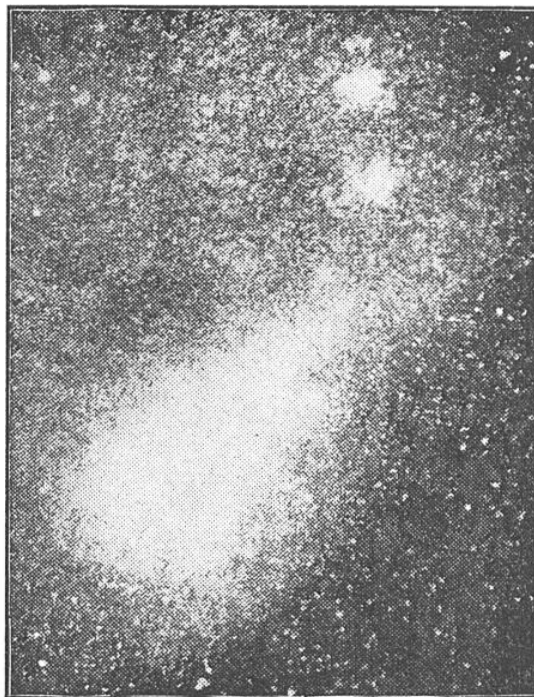


FIG. 6. — LA PETITE NUÉE DE MAGELLAN

Cet énorme amas d'étoiles irrégulier est situé dans l'hémisphère céleste austral et invisible d'Europe. Il est formé d'étoiles, dont le nombre est évalué à 500 000. Cet amas se trouve à 95 000 années-lumière de nous, bien en dehors des limites de notre galaxie, mais beaucoup plus proche (environ dix fois plus) que la nébuleuse spirale la plus rapprochée. On y a découvert plus de 200 variables Céphéides, dont l'étude a été de très grande importance.

nu; la petite nuée (fig. 6) a un diamètre apparent analogue à celui de l'ensemble des pléiades; la grande, dans sa partie la plus lumineuse que la lumière de la pleine Lune ne suffit pas à faire disparaître, est à peu près double dans chacune de ses dimensions. Dans les grands télescopes on les voit formées, comme la voie lactée, d'une multitude d'étoiles d'éclat apparent très faible. Shapley estime que

part d'entre elles. Elles sont en nombre immense dans le ciel, certainement des millions, qui sont à des distances formidables de nous. Les plus proches se montrent avec d'étonnants détails de structure. L'analyse spectrale révèle que ce ne sont pas des gaz lumineux, mais bien une réunion de milliards d'étoiles, et l'on a été conduit à admettre que chacune d'elles est une galaxie, analogue à celle dans laquelle

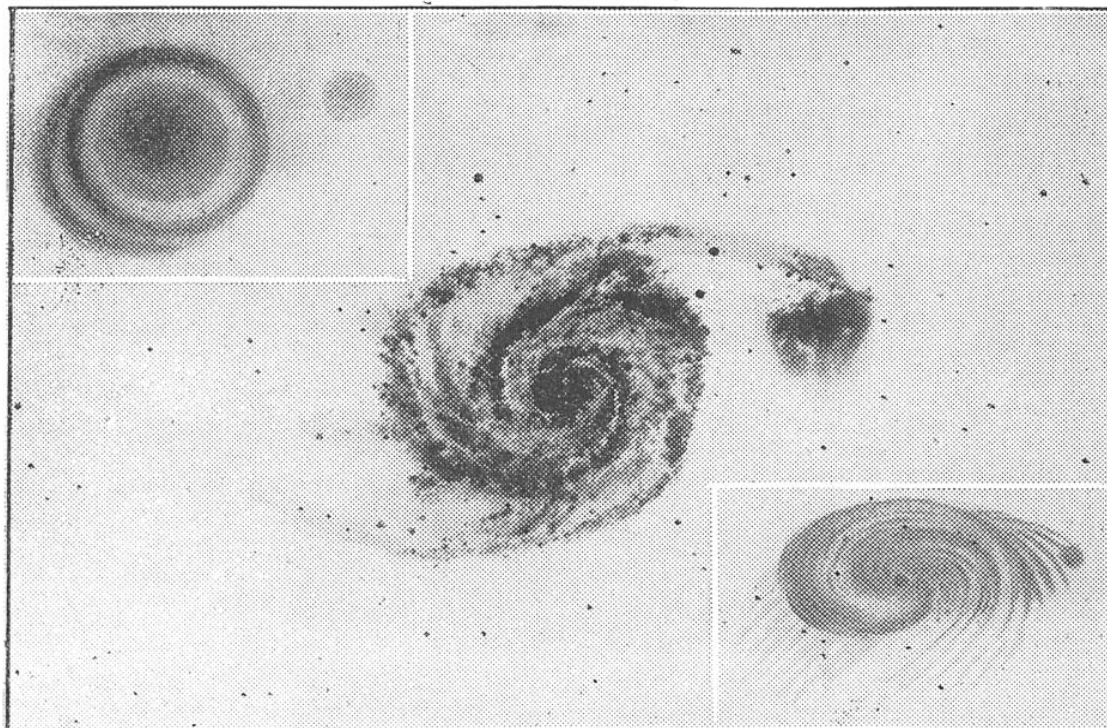


FIG. 7. — TROIS IMAGES, OBTENUES PAR DES MOYENS DE PLUS EN PLUS PUISSANTS, DE LA BELLE NÉBULEUSE SPIRALE DE LA CONSTELLATION DES CHIENS DE CHASSE

En haut : Dessin tracé par John Herschel vers 1830, avec un télescope de 45 cm de diamètre. La structure « en spirale » n'apparaît pas. En bas : Dessin tracé par Lord Rosse vers 1850. La structure en spirale (dont Lord Rosse fit la découverte capitale, sur un grand nombre de nébuleuses), apparaît admirablement; mais en comparant le dessin avec la photographie, on voit combien le dessin est simplifié. Au centre : Photographie de Ritchey, faite avec le télescope de 1,50 m du mont Wilson. On admirera la complexité de la structure et la richesse des détails. On voit par cet exemple quel progrès a été la conséquence de l'emploi de la photographie. Les deux dessins sont faits au crayon sur papier blanc; les parties lumineuses sont représentées en noir; les dessins sont des négatifs. Pour faciliter la comparaison, la photographie a été, elle aussi, reproduite en négatif, ce qui d'ailleurs en rend la lecture plus facile.

la petite nuée en contient environ 500 000.

Comme on l'a dit plus haut, on y a rencontré un grand nombre de Céphéides, dont l'étude a largement contribué à asseoir solidement la méthode des Céphéides pour la mesure des distances. Une fois les résultats admis, on peut évaluer, avec une bonne précision, la distance qui nous sépare des nuées de Magellan. On trouve 26 000 parsecs pour la grande et 29 000 pour la petite (soit 85 000 et 95 000 années-lumière). Nous verrons plus loin que ce n'est que le dixième de la distance des nébuleuses extragalactiques les plus proches. Ces « nuées » sont de petites galaxies, satellites de la nôtre; les galaxies lointaines offrent des exemples analogues.

Arrivons enfin aux véritables nébuleuses extragalactiques, dites aussi « nébuleuses spirales » à cause de l'aspect particulier qu'offrent la plu-

nous vivons, tandis que les autres sont vues de l'extérieur. Les plus lointaines se montrent comme de petits disques faiblement lumineux, et plus loin encore presque comme des points, qu'il n'est pas toujours facile de distinguer des étoiles. Comment évaluer la distance de ces objets célestes? C'est encore le principe d'analogie qui va jouer. La matière et ses lois sont les mêmes partout; certaines particularités permettent de reconnaître que des étoiles sont identiques à celles que nous connaissons, si ce n'est qu'étant beaucoup plus loin, leur éclat apparent est beaucoup plus faible. Dès lors, une mesure d'éclat apparent fait connaître le rapport des distances.

Malheureusement, la belle méthode spectroscopique de W. Adams n'est pas utilisable pour ces objets lointains: les milliards d'étoiles qui

les composent sont, en quelque sorte, mélangées; on peut bien obtenir un spectre de la lumière totale, mais non celui d'une étoile en particulier. Ce sont encore les Céphéides, et aussi les « étoiles nouvelles » ou « Novae » qui ont donné les résultats les plus sûrs.

Dans les deux nébuleuses spirales les plus proches, celle de la constellation du Triangle et la grande nébuleuse d'Andromède, on a découvert quelques variables du type Céphéide, naturellement d'éclats apparents très faibles en dépit des énormes éclats absolus des étoiles de cette catégorie. La mesure de la période n'est pas difficile; on en déduit la magnitude absolue puis, par comparaison avec la magnitude apparente, on calcule la distance. On trouve ainsi, pour la nébuleuse du triangle 260 000 parsecs et, pour celle d'Andromède, 276 000, soit 840 000 et 900 000 années-lumière. Et nous voilà d'emblée, à peine sortis de notre galaxie, bien près du million d'années-lumière. Mais nous voici encore une fois bloqués dans notre marche vers « toujours plus loin ». Les « novae » vont venir un instant à notre secours.

C'est un des plus extraordinaires phénomènes célestes que ces « étoiles nouvelles ». Nom d'ailleurs impropre, car il s'agit d'étoiles très petites, au moins en apparence, qui tout à coup se mettent à briller d'un éclat extraordinaire. En un point du ciel où rien ne faisait prévoir un tel phénomène, un beau soir apparaît une brillante étoile, parfois de première grandeur. Ce sont presque toujours des amateurs qui découvrent et signalent une « Nova », car les astronomes professionnels n'ont guère le temps de regarder le ciel en se promenant. Le service des informations astronomiques envoie bien vite un télégramme à tous les observatoires du monde; aussitôt les photomètres et spectrographes sont mis en batterie pour suivre l'astre nouveau qui, on le sait par tous les précédents, subira de remarquables changements dans les semaines et les mois qui vont suivre. En même temps, les observatoires qui s'occupent régulièrement de photographie céleste cherchent, dans leurs collections de clichés anciens, si quelque petite étoile n'occuperait pas la place exacte où brille la « Nova »; très souvent, on la trouve, généralement une très faible étoile, par exemple de douzième ou quatorzième grandeur; c'est cette étoile qui, en quelques heures, a subi ce formidable changement. L'augmentation d'éclat correspond à un écart d'au moins 10 magnitudes, c'est-à-dire que l'éclat a été brusquement multiplié par au moins 10 000. Que deviendrions-nous si, un beau jour, le Soleil passait au rang de « Nova »? Le maximum est généralement atteint en quelques heures, au plus en quelques jours; il est suivi d'une décroissance lente accompagnée de nom-

breuses fluctuations. En un temps plus ou moins long, quelques mois ou quelques années, l'étoile a repris son faible éclat initial. La figure 8 donne la courbe de variation de magnitude pour l'étoile qui parut brusquement dans la constellation de l'Aigle, le 8 juin 1918.

Pour quelques Novae on a une indication plus ou moins vague de la distance à laquelle l'étoile se trouve, et l'on peut calculer la magnitude absolue au moment du maximum; on trouve des chiffres assez variables, autour de

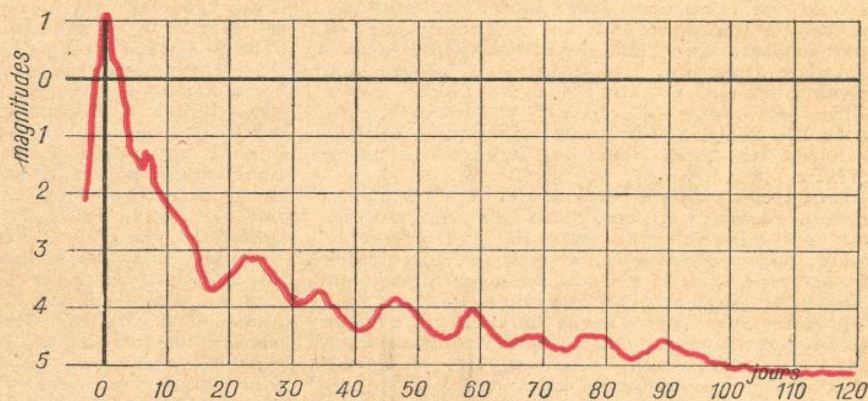


FIG. 8. — COURBE D'ÉCLAT D'UNE « NOVA »

Cette nova apparut subitement dans la constellation de l'Aigle le 8 juin 1918 et, pendant quelques heures, dépassa en éclat la belle étoile Véga. Après une croissance extraordinairement rapide, la décroissance commença, d'abord très rapide, puis de plus en plus lente avec de nombreuses fluctuations. La chute n'était pas terminée au bout de quatre mois.

— 5 (soit 8 000 fois l'éclat du Soleil).

Quelle est la cause de ce phénomène véritablement grandiose? On a pensé longtemps à un choc entre deux corps célestes, ou à la rencontre de l'étoile avec une masse gazeuse; on a abandonné ces théories qui font intervenir une cause externe, et l'on pense aujourd'hui que le phénomène est d'origine interne, tel qu'une brusque désagrégation atomique sous une cause inconnue. Mais ceci sort de notre sujet; revenons aux nébuleuses extra-galactiques.

Dans les plus proches d'entre elles on a observé de nombreuses Novae, plus de cent dans la nébuleuse d'Andromède, toutes à peu près de même éclat apparent à l'époque du maximum, avec une magnitude apparente moyenne de 16,5. Comme la distance de la nébuleuse est connue, on en déduit la magnitude absolue, et l'on trouve — 5,7 (environ 10 000 fois le rayonnement du Soleil). Ce chiffre est en accord assez bon avec ce que l'on admet pour les Novae de notre galaxie. Cela nous donne confiance dans l'hypothèse d'après laquelle toutes les Novae seraient à peu près identiques entre elles. Cela admis, toute observation photométrique d'une Nova dans une nébuleuse en fait connaître la distance.

Cependant, dans quelques nébuleuses, on a observé une Nova appartenant, de toute évidence, à un tout autre type, caractérisé par un éclat absolu formidable, par exemple 5 000 fois celui d'une Nova ordinaire. L'exemple le plus net est celui d'une Nova parue en 1885 dans la nébuleuse d'Andromède, dont la magnitude était 7,2, ce qui représente un éclat énorme pour une nébuleuse aussi lointaine, où les étoiles les plus brillantes ont des magnitudes au-

tour de 16. A elle seule, cette étoile avait un éclat à peu près égal au dixième de celui de la nébuleuse entière, qui compte des milliards d'étoiles. Connaissant sa distance par l'observation des Céphéides, on trouve que la magnitude absolue de cette Nova géante est -15 , ce qui lui donne un éclat absolu égal à 100 millions de fois celui de notre Soleil.

Il se peut que la magnifique Nova qui parut en 1572 et fut observée par Tycho-Brahé, étoile dont l'éclat apparent surpassa celui de Vénus et qui fut visible en plein jour, ait été une étoile de la même catégorie. En la supposant de la même classe que celle de la nébuleuse d'Andromède (magnitude absolue -15) et en admettant qu'elle ait atteint la magnitude apparente -4 , on peut calculer sa distance. On arrive à quelque 5 000 années-lumière, ce qui la met largement dans les limites de notre galaxie.

L'apparition d'une Nova ordinaire est un phénomène assez fréquent, peut-être une dizaine par an dans chaque galaxie, y compris la nôtre, tandis que les Novae géantes, auxquelles on a donné le nom de « Supernovae », seraient très rares, peut-être en moyenne un fois tous les mille ans dans chaque galaxie. Il semble cependant qu'on en ait observé quelques-unes dans des nébuleuses lointaines, ce qui donne encore une évaluation de distance.

Enfin, dans quelques nébuleuses lointaines où les vulgaires novae n'ont pu être découvertes et qui n'ont pas eu la chance d'être photographiées au moment de l'apparition d'une supernova, on peut découvrir, sur le fond en apparence uniforme de la masse des étoiles, quelques étoiles que leur éclat particulièrement grand détache de l'ensemble. On admet que chacune d'elles est une « étoile géante », comme il en existe dans notre galaxie, telles Rigel ou Canopus, et on lui attribue, un peu arbitrairement, la magnitude -6 ; en mesurant l'éclat apparent, très faible, de ces géantes, on peut évaluer la distance.

Tout cela, bien un peu parsemé d'hypothèses, mais qui cependant fixe des ordres de grandeur, nous conduit à des distances de deux à huit millions d'années-lumière, par suite jusqu'à quelque 10 000 fois la distance à laquelle se trouve notre voisine la nébuleuse d'Andromède, de laquelle, comme on vient de le voir, nous avons beaucoup appris.

Au delà, on a encore des millions de nébuleuses dans lesquelles il est impossible d'identifier une étoile séparée de la foule des autres. Il n'y a pas d'autre ressource que de raisonner sur l'ensemble. On sait très bien que les diverses nébuleuses extra-galactiques sont assez inégales entre elles; la nébuleuse du « Triangle », la plus proche de nous, est beaucoup plus petite que la nôtre et que celle d'Andromède qui sont parmi les grandes. On peut cependant admettre que, sur un grand nombre, il y a une moyenne assez bien déterminée. Raisonnant comme si elles étaient toutes pareilles, on trouve, pour les plus lointaines, des distances de 150 millions d'années-lumière.

La fuite des nébuleuses, ou l'expansion de l'Univers

On ne peut parler de ces formidables distances sans penser à cette extraordinaire découverte annoncée en 1929 par l'astronome amé-

ricain Hubble : la fuite des nébuleuses, qui semblent s'éloigner de nous avec des vitesses formidables, d'autant plus grandes que l'astre est plus lointain. C'est en étudiant le spectre des nébuleuses lointaines que cet étrange résultat a été obtenu.

Avec les puissants moyens dont on dispose aujourd'hui il est possible d'obtenir le spectre d'une nébuleuse lointaine, image sur laquelle, il est vrai, les lumières de toutes les étoiles sont mélangées. On est obligé de faire usage d'un type spécial de spectrographe, où tout est sacrifié à la grande luminosité. Le spectre obtenu est bien peu dispersé; il occupe sur la plaque photographique une longueur totale qui n'atteint pas 5 mm. On y voit cependant quelques lignes d'absorption; l'aspect général est celui d'un spectre du type G (voir la figure 3) auquel appartient notre Soleil, et qui est le plus répandu. On distingue en particulier les deux fortes lignes du calcium ionisé, désignées par les lettres H et K, à la limite entre les radiations violettes et l'ultraviolet. Pour les nébuleuses proches, comme celle d'Andromède dont la lumière nous parvient en moins d'un million d'années, ces raies sont bien à leur place; il n'y a aucun doute sur leur identité. Mais à mesure qu'on passe à des nébuleuses plus lointaines, on trouve ces raies de plus en plus déplacées vers les grandes longueurs d'onde; pour les plus lointaines on trouve les raies H et K non plus à la limite des radiations visibles, mais en plein dans le bleu, en conservant leur aspect et leur écartement. On ne connaît à un tel déplacement qu'une explication : les nébuleuses lointaines s'éloignent de nous, avec des vitesses énormes et d'autant plus grandes que l'astre est plus lointain. La plus grande vitesse mesurée est de 42 000 kilomètres par seconde. Pour les nébuleuses dont la distance était déjà connue approximativement, on trouve qu'il y a proportionnalité entre cette vitesse d'éloignement et la distance : chaque fois qu'on s'éloigne de 1 million de parsecs, la vitesse de fuite augmente de 500 km/s. Admettant cette loi pour toutes les distances, même les plus immenses, on peut calculer la distance quand on connaît la vitesse. Pour la vitesse record de 42 000 km/s, on trouve une distance de 84 millions de parsecs, ou 270 millions d'années-lumière. C'est la plus grande distance évaluée, et elle n'est pas en grand désaccord avec celle estimée par une toute autre méthode.

Il serait naïf de croire que c'est nous, notre chétif Soleil, qui repoussons ainsi tout l'Univers, dans toutes les directions. La vérité est évidemment toute autre : l'Univers se dilate, tout s'agrandit en conservant les mêmes rapports. La figure formée par l'ensemble de l'Univers reste semblable à elle-même, et chaque étoile s'éloigne de toutes les autres. Mais, direz-vous, avec les vitesses de dizaines de milliers de kilomètres par seconde, où seront toutes ces belles galaxies dans chaque siècle? Verrons-nous s'évanouir dans le lointain notre belle voisine d'Andromède et ces admirables nébuleuses spirales? Soyez sans inquiétude. Les vitesses sont immenses à notre échelle, mais les distances le sont encore plus. En 6 millions d'années, chaque distance s'augmente de 1/1 000 de sa valeur; en 6 millions d'années rien ne sera changé.

Charles FABRY.

D'OU VIENNENT LES TRAINÉES NUAGEUSES DANS LE SILLAGE DES AVIONS ?

par Paul LUCAS

Qui n'a observé dans le ciel, par beau temps, des trainées nuageuses plus ou moins nettes et plus ou moins étendues, s'allongeant au fur et à mesure que progresse un point noir à peine visible, perdu dans la profondeur du ciel ? Elles trahissent le passage d'un avion naviguant à haute altitude. Tantôt présents, tantôt absents, prenant naissance soit immédiatement derrière les orifices d'échappement des moteurs, soit à plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres à l'arrière, parfois s'effaçant en quelques secondes ou quelques minutes, parfois subsistant des heures entières ou s'élargissant peu à peu jusqu'à couvrir tout le ciel, le tout sans cause apparente, ces panaches nuageux demeurèrent longtemps mystérieux malgré leur origine évidente, la vapeur d'eau résidu de la combustion de l'essence dans les moteurs. Malgré les difficultés que présente l'expérimentation à haute altitude, des études systématiques ont pu mettre en évidence les conditions physiques favorables ou défavorables à la formation de ces condensations, guidant ainsi constructeurs et pilotes dans le choix des procédés à mettre en œuvre pour éviter de laisser dans le ciel des traces aussi visibles de leur passage et de faciliter ainsi grandement la tâche de la défense antiaérienne.

L'humidité atmosphérique

MÊME par les plus beaux temps, l'air contient toujours une certaine quantité de vapeur d'eau, provenant de l'évaporation incessante qui se produit à la surface des mers, des lacs et des rivières, du sol également, toujours humide, de la respiration de l'homme et des animaux et enfin des végétaux. Cette vapeur, étant incolore, n'est pas visible.

L'humidité de l'atmosphère peut s'évaluer de plusieurs manières. La plus simple théoriquement, mais la moins usitée en pratique car elle exige des opérations compliquées, est de mesurer le poids de vapeur d'eau contenu dans un volume déterminé, par exemple un mètre cube. A une température donnée, l'air ne peut contenir une quantité indéfinie de vapeur d'eau; il est dit saturé quand la quantité de vapeur d'eau présente atteint une valeur maximum qui varie très fortement avec la température. C'est ainsi qu'à 0° C un mètre

cube d'air peut contenir normalement jusqu'à 4,85 g de vapeur d'eau; à -10° C, ce chiffre tombe à 2,17 g; à 0,90 g pour -20° C et 0,35 g pour -30° C. Nous ne considérons ici que les températures inférieures à 0° C, les seules qui nous intéressent pour l'étude du problème de la condensation à haute altitude.

On désigne sous le nom d'humidité relative d'une masse d'air le rapport du poids de la vapeur d'eau qu'elle contient effectivement au poids maximum qu'elle pourrait contenir dans les conditions de température où elle se trouve (1). L'humidité relative varie donc, dans les conditions normales, entre 0 % et 100 %. Si ce dernier taux vient à être dépassé, une partie de la vapeur d'eau se condense en fines gouttelettes donnant naissance par exemple à un brouillard ou à un nuage.

Cela peut se produire en particulier lorsque une masse d'air se refroidit, phénomène d'observation courante. Sup-



T W 40065

FIG. 1. — TOUT A FAIT EXCEPTIONNELLEMENT, LES CONDENSATIONS NUAGEUSES, QUI PRENNENT NAISSANCE LE PLUS SOUVENT A AU MOINS PLUSIEURS MÈTRES DERRIÈRE L'APPAREIL, PEUVENT SE FORMER IMMÉDIATEMENT DERRIÈRE LES MOTEURS, COMME ICI AVEC UN JUNKERS 88

(1) C'est aussi le rapport de la tension de la vapeur existant dans l'air à la tension maximum qui correspond à sa température.

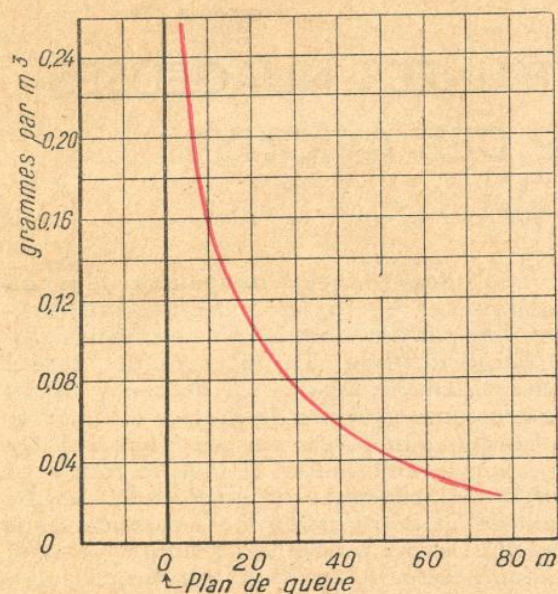


FIG. 2. — COMMENT VARIE LA TENEUR DE L'AIR EN VAPEUR D'EAU DANS LE SILLAGE D'UN AVION

posons par exemple que dans une pièce d'appartement règne pendant la journée une température de 15° C avec une humidité relative de 50 %. Le poids maximum d'eau que peut contenir un mètre cube d'air à 15° C

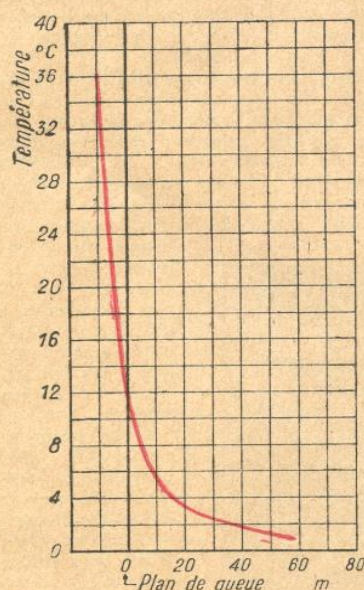


FIG. 3. — COMMENT VARIE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR MÉLANGÉ AUX GAZ D'ÉCHAPPEMENT DANS LE SILLAGE D'UN AVION

On a porté ici en ordonnées l'excès de température du mélange air-gaz d'échappement sur l'air ambiant non perturbé.

l'air de la salle contient donc 6,42 g par mètre cube. Ce poids correspond à une humidité relative de 100 % à la température de 4,1° C. Si à la tombée de la nuit les vitres de la pièce se trouvent refroidies au-dessous de cette valeur, l'air, au contact des fenêtres, devient sursaturé et des gouttelettes se déposent sur la vitre.

Le même phénomène s'observerait si, la température restant constante, un grand nombre de personnes séjournaient dans cette pièce, enrichissant l'air en

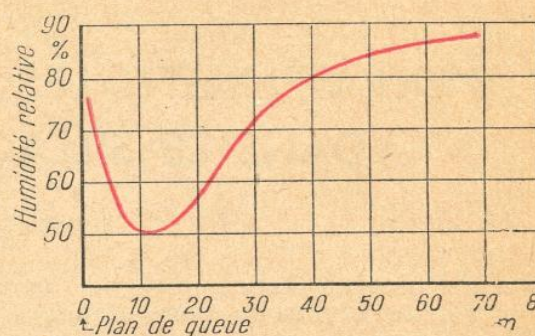


FIG. 4. — LES CONDITIONS NÉCESSAIRES A LA FORMATION DE NUAGES DE CONDENSATION

Cette courbe se rapporte à un avion du type Henschel 126 et à une température extérieure de -45° C. Dans ces conditions, une humidité relative d'au moins 50 % est nécessaire pour que des condensations se produisent et pour cette valeur elles s'observeront entre 10 et 20 m à l'arrière du plan de queue. Si l'humidité relative vient à croître, les condensations gagnent rapidement vers l'avant et l'arrière.

vapeur d'eau jusqu'à dépasser l'humidité relative de 100 % au voisinage de la fenêtre, toujours à une température légèrement inférieure au restant de la pièce.

A la vérité, l'air peut très bien contenir, sans qu'on observe de condensation, une quantité de vapeur plus grande que celle qui correspond à la saturation. Il est dit sursaturé et son humidité relative peut dépasser de beaucoup 100 %, puisqu'elle peut atteindre exceptionnellement jusqu'à 400 %. Mais la sursaturation n'est possible que lorsque l'air est entièrement privé

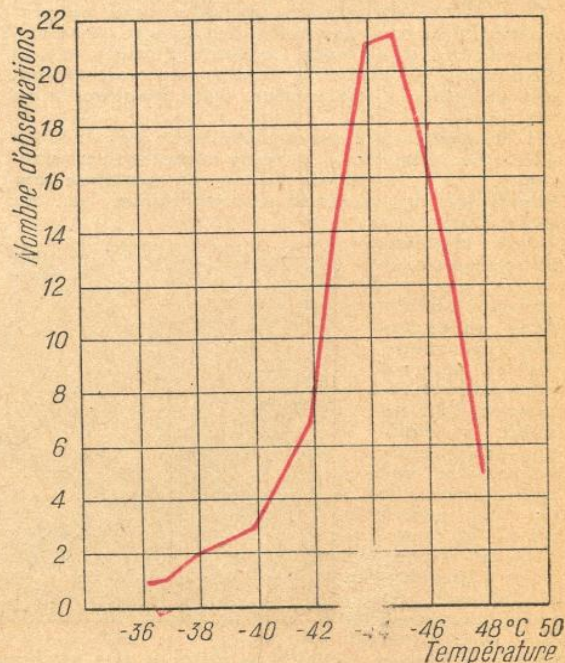


FIG. 5. — LES CONDENSATIONS SE PRODUISENT LE PLUS SOUVENT POUR DES TEMPÉRATURES DE L'ATMOSPHÈRE AMBIANTE VOISINES DE -45° C

de toute poussière solide ou liquide. Une poussière joue en effet le rôle d'un centre de condensation, et dès que la condensation débute en un point, l'équilibre instable de la sursaturation se trouve rompu, la condensation s'étendant à toute la masse. Les poussières de charbon qui souillent l'atmosphère des grandes villes jouent un rôle particulièrement actif comme noyaux de condensation.

Ajoutons que la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère peut donner naissance directement, quand elle s'effectue au-dessous de 0°C , à des cristaux de glace. C'est le phénomène inverse de la sublimation qui désigne le passage direct de l'état cristallin à l'état de vapeur. La sublimation est régie par des lois analogues à celles de la vaporisation d'un liquide, et en particulier on peut mettre en évidence une teneur maximum en vapeur d'eau de l'atmosphère au delà de laquelle la vapeur se condense à l'état de glace. Il est remarquable de noter que cette teneur, pour de très basses températures (-50°C à -65°C) est inférieure à celle qui détermine la condensation en gouttelettes liquides. Mais la formation directe de cristaux de glace ne peut avoir lieu que lorsque existent au préalable dans l'atmosphère des cristaux de glace jouant le rôle de germes de condensation et rompant l'équilibre instable de la sursaturation.

Le mécanisme de la condensation dans le sillage des avions

Il résulte de ce que nous venons de dire que des condensations à l'état de gouttelettes ou de cristaux de glace peuvent prendre naissance de deux manières : soit en envoyant dans une atmosphère sursaturée des noyaux de condensation, soit (l'atmosphère contenant déjà les noyaux nécessaires) en augmentant l'humidité relative par apport supplémentaire de vapeur.

On a longtemps rapporté à la première hypothèse la formation des panaches nuageux à l'arrière des avions naviguant à haute altitude. Les gaz d'échappement des moteurs contiennent en effet de nombreuses particules charbonneuses incomplètement brûlées et microscopiques qui paraissent toutes désignées pour jouer le rôle de noyaux de condensation. Leur rôle n'est pas douteux, mais de nombreuses expériences faites récemment en Allemagne (1) ont démontré que

(1) Conférence du Dr aufm. Kampe à la Société Lilienthal. Luftwissen 1-6-43.

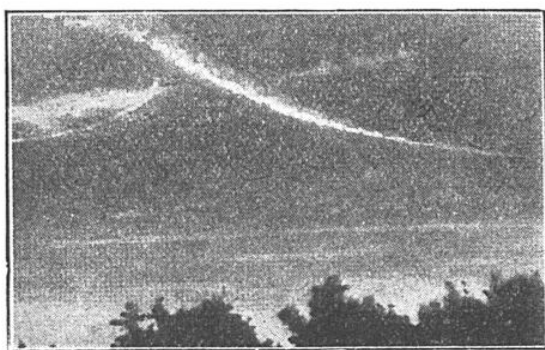
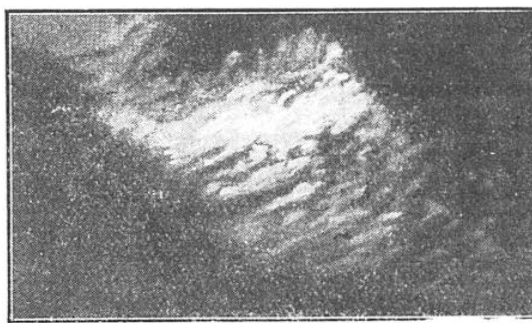


FIG. 6. — LES NOYAUX DE CONDENSATION S'ALOURDISSENT PEU À PEU TOMBENT LENTEMENT VERS LE SOL COMME DE LARGES FLOCONS, ÉLARGISSANT LE PANACHE NUAGEUX EN UNE BANDE VERTICALE

T W 40066



T W 40067

FIG. 7. — UN HALO A TRAVERS UN CIRBUS ARTIFICIEL PROVOQUÉ PAR LE PASSAGE D'UN AVION

le principal rôle était joué par la vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère par les tuyaux d'échappement des moteurs.

L'étude systématique de ces nuages de condensation a été effectuée à l'aide d'un avion Henschel 126 équipé d'un moteur « Bramo-Fafnir ». Consommant, entre 8 000 et 10 000 m, environ 180 litres d'essence à l'heure, ce moteur évacuait dans l'atmosphère environ 50 g de vapeur par seconde (en admettant qu'un litre d'essence donne un litre d'eau). Cette vapeur se mélange intimement avec une masse d'air extérieur de plus en plus importante et il est possible d'évaluer l'humidité des volumes successifs qu'elle occupe, en admettant qu'ils restent sphériques, ce qui semble voisin de la réalité, et en mesurant la vitesse de diffusion de cette vapeur. On peut tracer ainsi la courbe de la figure 2 qui donne le poids de vapeur par mètre cube dans le sillage de l'avion à différentes distances des plans de queue.

Pour en déduire l'humidité relative, en faisant la somme de l'humidité de l'atmosphère non perturbée et de celle introduite par la vapeur d'échappement, il est indispensable de connaître d'une manière un peu précise la température du mélange air-vapeur aux différentes étapes de la diffusion de la vapeur. La figure 3 indique le résultat des mesures effectuées derrière l'avion cité plus haut.

En comparant les deux courbes ci-dessus on voit qu'immédiatement à l'arrière des moteurs le poids de vapeur par mètre cube est le plus élevé, ce qui favoriserait la formation d'un nuage de condensation si la température n'était elle-même très élevée en ces endroits, où l'humidité relative demeure faible. De même, à 100 m par exemple à l'arrière de l'avion, la température est très basse, ce qui jouerait en faveur de la condensation si en même temps le poids de vapeur fournie par le moteur n'était voisin de zéro. L'humidité relative y est donc voisine de sa valeur dans l'atmosphère non perturbée. Les conditions nécessaires pour qu'un nuage de condensation se forme ne semblent donc réalisées ni au voisinage de l'avion, ni loin derrière lui. Elles peuvent l'être dans l'intervalle. Pousser les recherches plus loin par le calcul, c'est-à-dire chercher à quelle distance intermédiaire l'humidité relative est maximum, compte tenu de tous les facteurs, y compris la température, est possible malgré l'incertitude qui règne sur les éléments de base. La figure 4 indique les résultats de cette recherche sous une forme assez frappante puisqu'elle indique quelle doit être l'humidité relative de l'atmosphère ambiante

non perturbée pour qu'une condensation se produise et à quelle distance elle se produira sur l'arrière de l'avion. Cette courbe n'a aucun caractère de généralité puisqu'elle se rapporte spécialement à l'avion Henschel 126 considéré, et qu'elle n'est valable que pour une température extérieure de -45°C (cette température a été choisie parce que c'est pour elle que se présentent le plus souvent les premiers signes de condensation ainsi que le montre la figure 5). A cette température, une humidité relative d'au moins 50 % est nécessaire, et le panache nuageux prendra naissance entre 10 et 20 m à l'arrière du plan de queue.

Il est intéressant d'étudier comment varie cette humidité relative minimum indispensable en fonction de la température. C'est ce que l'on a fait sur la figure 8. La courbe en trait plein représente non l'humidité relative, mais le poids de vapeur d'eau nécessaire par mètre cube à chaque température pour qu'une condensation se produise. Les courbes en pointillé sont les courbes de saturation eau liquide-vapeur et glace-vapeur. L'humidité relative est ici le rapport entre les ordonnées de la courbe en trait plein et celles de la courbe de saturation supérieure; on vérifie qu'elle est sensiblement de 50 % aux alentours de -45°C . L'examen de cette figure révèle

qu'entre 8 000 et 10 000 m, avec un Henschel 126, des condensations auront toujours lieu pour des températures de l'air inférieures à -48°C ou -49°C , point de rencontre de la courbe avec l'axe horizontal, quelle que soit l'humidité de cet air, même si elle est nulle. A partir de -43°C (intersection avec la courbe de saturation glace-vapeur), des condensations de cristaux de glace peuvent se produire, si les noyaux de condensation indispensables sont présents, ce qu'ont vérifié des vols au voisinage de cirrus.

Il est évident que plus l'air ambiant est sec et plus les panaches de condensation sont courts et plus rapidement ils disparaissent. Ils subsistent dans l'air humide, mais ne tardent pas à geler. Chacun des petits glaçons qui prennent naissance peut alors jouer le rôle de noyau de condensation pour la formation de cristaux de glace, à condition qu'on se trouve dans des conditions favorables de sursaturation, c'est-à-dire entre les deux courbes de saturation de la figure 8. Les particules se chargent ainsi progressivement de cristaux de glace, jusqu'à prendre en certains cas l'aspect de flocons de neige de plus en plus lourds qui tombent vers le sol

(fig. 6). De proche en proche la condensation peut s'étendre et gagner peu à peu une fraction importante du ciel, donnant ainsi naissance à de véritables cirrus artificiels.

Peut-on supprimer les condensations?

Il est d'un intérêt évident pour les aviateurs naviguant au-dessus d'un territoire ennemi de ne pas trahir leur présence et encore moins la direction précise de leur route en laissant dans le ciel des traces aussi évidentes qu'une traînée d'un blanc éclatant. Ne peut-on s'opposer à leur formation?

L'analyse que nous venons de faire des conditions favorables à la condensation indique les moyens auxquels on pourrait recourir pour la supprimer. La cause principale résidant dans la vapeur rejetée par le moteur, il est indiqué de chercher à éliminer cette vapeur, au moins en

grande partie.

On y parviendrait soit en la condensant, soit en l'absorbant, ce qui se heurte à des difficultés techniques pratiquement insurmontables.

On a proposé également de mélanger à l'essence habituelle un composé moins riche en atomes d'hydrogène, tel que le benzol. Mais, par suite de la sensibilité de ce dernier au froid, il est difficile d'en mélanger de grandes quantités à l'essence.

Il serait possible aussi d'envisager d'élever la température des gaz d'échappement sans accroître leur teneur en vapeur d'eau, par exemple en les mélangeant à l'air de refroidissement du radiateur.

Enfin, l'élimination des noyaux de condensation que représentent les particules charbonneuses des gaz d'échappement permettrait sans aucun doute de réduire sensiblement la densité de la condensation, ce qui, sans la faire disparaître entièrement sans doute, la rendrait moins facilement discernable à partir du sol.

Mais la méthode de beaucoup la plus simple et la plus effective consiste à abandonner rapidement la couche d'air où les conditions de température et d'humidité sont favorables à la formation des condensations nuageuses. Réduire l'admission des gaz entraîne déjà une diminution de la richesse de l'échappement en vapeur d'eau et une atténuation sensible de la condensation. Quelques secondes de vol plané suffisent alors pour amener l'appareil dans des couches plus sèches ou plus chaudes où le panache révélateur ne se formera plus.

Paul LUCAS.

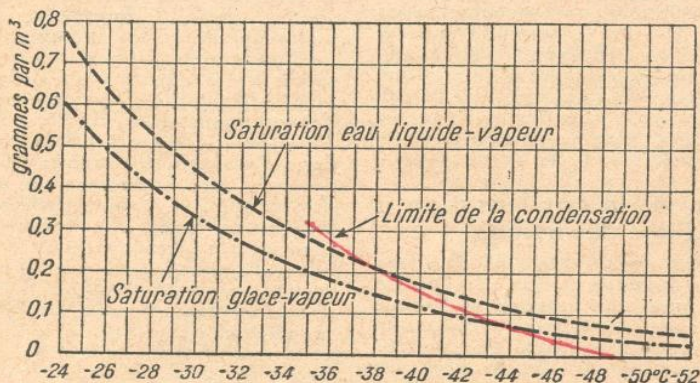


FIG. 8. — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'HUMIDITÉ DE L'AIR AMBIANT SUR LA FORMATION DES NUAGES DE CONDENSATION

En abscisses les températures, en ordonnées le poids de vapeur d'eau par mètre cube de l'air ambiant. La courbe en trait plein marque pour chaque température le poids d'eau minimum nécessaire pour que se produisent des condensations nuageuses.

QUE SERA L'AUTOMOBILE DE DEMAIN ?

par Henri PETIT

Ancien élève de l'Ecole Polytechnique
Ancien Président de la Société des Ingénieurs de l'Automobile

Si l'on se fonde uniquement sur des considérations économiques, on peut admettre, sans faire preuve de pessimisme, que nous devons, au moins pendant quelques années, pratiquer des économies de tous ordres et que, par suite, la voiture d'après guerre sera bon marché et consommera peu. Sur le terrain industriel et à plus longue échéance, on peut se demander si la France pourra reprendre pour ses fabrications automobiles ses habitudes libérales d'avant-guerre. Cette industrie sera obligée, probablement dans une plus large mesure que par le passé, de tenir compte de la concurrence de l'étranger. Comment soutenir en particulier la concurrence américaine ? Quoi que nous fassions, nos voitures seront toujours plus chères que celles des Etats-Unis, construites en plus fortes séries. Le domaine qui nous reste doit être celui de la qualité. L'industrie française qui longtemps, jusqu'en 1914, a tenu la tête pour la construction des voitures de tourisme, doit pouvoir reconquérir une place de premier rang. La voiture de haute qualité qui verra le jour à la fin des hostilités rassemblera la plupart des perfectionnements ou des réalisations d'idées nouvelles dont beaucoup ont eu leur origine chez nous. Le problème de la voiture de demain doit être, en effet, abordé aussi sous l'angle de la pure technique. Ainsi il est possible de montrer ce que pourrait être la voiture dans laquelle seront condensées toutes les idées nouvelles qui ont vu le jour depuis quelque cinq ans et dont la plupart, sans être encore complètement au point, ont cependant pénétré nettement dans la pratique expérimentale.

La petite voiture utilitaire

C'EST sera, si vous voulez, la voiture des restrictions. Admettons (ce qui n'est peut être pas très loin de la vérité, au moins pour les temps prochains de la reprise de notre industrie) que rien, pendant quelques années, ne doit être sacrifié au pur agrément et que toutes les ressources dont nous disposons doivent au contraire être employées pour l'utile. Si nous pouvons, sans frais supplémentaires, joindre un peu d'agréable à cet utile — et nous verrons que c'est possible — nous ne manquerons pas de le faire, mais la directive principale et d'ailleurs presque absolue, sera l'utile.

Pour être économique, une voiture doit essentiellement être légère. L'expérience prouve en effet que le prix d'une voiture peut être déterminé à bien peu de chose près lorsqu'on connaît son poids. L'économie d'achat est donc liée étroitement à la légèreté. L'économie d'usage en dépend aussi et d'une façon encore plus serrée. La consommation d'une voiture en combustible est en effet très sensiblement proportionnelle à son poids total roulant (à condition, bien entendu, que l'on compare entre elles des voitures comparables, c'est-à-dire capables de vitesse du même ordre).

L'encombrement des routes et plus encore celui des rues, des villes et des voies de la banlieue immédiate va redevenir assez rapidement aussi grand après la guerre qu'il l'était avant, si même il ne dépasse ce que nous avons connu dans le passé. On sera donc conduit à donner aux voitures des dimensions extérieures réduites, en même temps qu'à les doter de hautes capacités évolutives.

Parmi ces capacités on est tenté de citer au premier rang la vitesse maximum possible. Mais le facteur qui intervient le plus, c'est l'accélération plutôt que la vitesse. Or, pour obtenir d'une voiture une accélération élevée, il faut, soit beaucoup de puissance, soit très peu de poids. Comme beaucoup de puissance coûte cher du point de vue consommation, on revient à la même conclusion que pour ce qui touche le prix de revient kilométrique, à savoir, construire léger.

La recherche de l'économie va-t-elle conduire à une simplification de la mécanique générale de la voiture, simplification qui, poussée à l'extrême, en ferait un instrument rudimentaire rappelant les automobiles des premiers âges ? Là, une observation s'impose.

Tout objet sortant des mains humaines se perfectionne au cours des temps et l'orientation de ce perfectionnement est dirigée de façon à permettre de rendre l'usage de l'objet plus aisé. Ce but ne peut d'ailleurs généralement être atteint que par certaine complication dans l'agencement des organes. Contrairement à une opinion très généralement admise, le perfectionnement ne réside pour ainsi dire jamais dans une simplification, mais au contraire dans une complication de la construction en vue d'une simplification de l'utilisation.

Notre voiture utilitaire et économique sera évidemment l'instrument du plus grand nombre. Son prix, relativement modéré, permettra à une très large couche d'acheteurs non encore adaptés à l'automobile de goûter à la locomotion mécanique. On ne peut songer à demander à ces automobilistes tout neufs d'acquiescer une science approfondie qui leur permette de con-

duire une mécanique délicate et d'un entretien difficile. L'automobile doit être populaire, n'importe qui doit pouvoir s'en servir, n'importe quand et sans aucune connaissance spéciale.

Reprenons, si vous voulez, la comparaison bien connue de la voiture automobile et de la montre : une montre a un mécanisme compliqué et délicat, mais ce mécanisme est complètement enfermé dans une boîte étanche, et n'importe qui peut s'en servir. Les seuls soins à donner à une montre résident dans le remontage journalier. Si la montre ne va plus, on la donne à un spécialiste qui la répare ou on la remplace. Mais on ne la répare pas soi-même.

Il doit en être de même de la voiture populaire. Elle doit fonctionner si on a eu le soin de remplir son réservoir de combustible et au maximum de vérifier la présence d'huile dans le carter du moteur. Si elle ne fonctionne pas dans ces conditions, on l'amène dans une station-service qui fait le nécessaire. Mais le conducteur propriétaire ne doit pas avoir à y toucher.

Si nous voulions traiter complètement le sujet que nous exposons ici, de la voiture économique et utilitaire, nous devrions maintenant entrer dans le détail des solutions mécaniques que l'on adoptera pour en faire le meilleur objet possible. Mais nous allons tout à l'heure aborder un sujet un peu différent avec la voiture de haute qualité et nous nous abstenons de cet examen approfondi qui nous amènerait à des redites inévitables.

La belle voiture de demain

Nous allons essayer de concevoir la voiture de demain comme réunissant la plupart des solutions nouvelles apparues depuis les quelques mois qui ont précédé la guerre, ou même des solutions naguère inconnues ou inusitées et qui se sont révélées, à l'étude, susceptibles d'apporter un perfectionnement dans la construction. Cette voiture, ce sera non pas peut-être la voiture future, mais plutôt la voiture *conditionnelle*, étant entendu qu'il est loin d'être certain qu'un véhicule construit immédiatement après la guerre, réunisse tous les perfectionnements nouveaux, certains de ceux que nous envisageons pouvant d'ailleurs ne pas être retenus à l'usage.

La carrosserie coque

Il semble bien que le châssis, ou mieux, le cadre, ait fait son temps, tout au moins pour les voitures petites et moyennes. Le cadre, rappelons-le, c'était cette charpente sur laquelle venaient se fixer d'une part les organes mécaniques de la voiture : essieux, moteur, transmission, direction, etc., et d'autre part la carrosserie elle-même avec tous ses accessoires. Les solutions les plus en faveur dans la construction actuelle comportent une carrosserie suffisamment étoffée et surtout suffisamment résistante pour servir de bâti à la voiture tout entière. Autrement dit, le châssis s'est fondu dans la carrosserie elle-même qui a reçu, bien entendu, à cet effet, une forme nouvelle, tout au moins dans sa partie inférieure. L'avantage de la coque saute immédiatement aux yeux. Alors que le cadre, qui est composé d'un assemblage d'éléments ne s'éloignant que très peu d'un plan n'offrirait par conséquent qu'un moment d'inertie de torsion relativement faible, la carrosserie coque se présente au contraire comme une poutre de grande hauteur qui présente une très grande résistance à la flexion dans tous les

sens, et même à la torsion autour de l'axe longitudinal.

Les carrosseries actuelles des voitures de série sont, pour 90 %, des carrosseries fermées. Elles comportent par conséquent : 1° un soubassement inférieur constituant le plancher et les éléments des parties verticales ; 2° une paroi supérieure horizontale constituée par le pavillon, lequel se prolonge vers l'avant par les montants du pare-brise et vers l'arrière par les formes de fuite et 3° enfin, toute une partie moyenne qui comprend les cadres des portières et les montants.

Autrefois, les carrosseries étaient construites entièrement en éléments de bois assemblés les uns aux autres suivant les règles de l'ébénisterie. Peu à peu cette construction a évolué et à son dernier stade, est arrivée à l'une de ces deux solutions : soit à la carrosserie tout entière en tôle dont les éléments sont en général soudés à l'autogène ou électriquement les uns aux autres, soit, disposition plus nouvelle encore, en éléments coulés dont la matière est constituée par des alliages légers d'aluminium et de magnésium.

La méthode de fabrication par éléments coulés en alliage léger paraît présenter un avantage certain. Sans doute, la matière première est d'un prix élevé. Mais les procédés de fabrication peuvent s'appliquer tout aussi bien à des séries moyennes qu'à des séries plus importantes. Dans le premier cas, on peut concevoir les éléments coulés au sable, et, en cas de grande série, les moulages en coquille. Les carrosseries en tôle d'acier, au contraire, nécessitent toujours, quelle que soit l'importance de la série, sensiblement le même outillage de presses, de poinçons et de matrices.

Du point de vue réparations, les éléments en alliage assemblés par boulons les uns aux autres, donnent plus de facilité : on remplace simplement l'élément déformé ou brisé, et la matière en conserve d'ailleurs une certaine valeur.

Une différence notable existe donc dans les procédés de fabrication et dans la constitution même de la caisse. Dans les caisses en tôle d'acier, les revêtements travaillent et font partie de la poutre armée elle-même. Dans la carrosserie en éléments assemblés au contraire, il y a une sorte de squelette ou mieux de charpente en éléments résistants, charpente qui est recouverte de feuilles minces. Celles-ci constituent à proprement parler les parois.

Ces feuilles minces peuvent être faites soit en tôle d'acier, soit en tôle d'alliage d'aluminium, soit enfin, dernier cri des progrès actuels, en matière moulée. On sait que l'industrie des résines synthétiques s'est développée avec une rapidité prodigieuse depuis ces dernières années et a ouvert des horizons nouveaux à la construction en général et à la fabrication des voitures automobiles en particulier.

Il est un autre élément qui pourra entrer pour près de 100 % dans la constitution des carrosseries-poutres, au moins pour les voitures légères. Cet élément, c'est le bois. Des procédés de fabrication comme celui qui a été imaginé et utilisé par la Société Pleyel permettent de faire de véritables moulages avec des feuilles de bois contreplaqué. Des méthodes de collage, faciles à appliquer, donnent la possibilité de renforcer les éléments ainsi constitués partout où cela est nécessaire. Des prototypes de voitures légères sont déjà sortis avec ce mode de construction.

La construction d'une véritable carrosserie-poutre devra être très soigneusement étudiée par des méthodes tout à fait analogues à celles qu'utilisent les constructeurs de ponts, de façon à faire travailler dans des conditions normales chacun des éléments qui jouent comme on le voit, un double rôle, puisque l'enveloppe elle-même concourt à la résistance; c'est donc une étude très nouvelle qu'il va falloir faire, étude qui ne donnera le résultat complet auquel on

est en droit de prétendre que si tous les éléments de la carrosserie sont soumis à un taux de travail aussi uniforme que possible, ce qui donnera la plus grande légèreté.

Le problème de la carrosserie-poutre, qu'il s'agisse de la carrosserie en tôle d'acier ou de la voiture en bois est d'autant plus facile à résoudre que la voiture est plus petite. La solution de la construction en pièces coulées et assemblées paraît assez souple pour pouvoir s'étendre à des voitures de dimensions très différentes: elle se rapproche d'ailleurs davantage, dans son principe même, de la construction de type ancien par cadre et carrosserie séparée, puisque le revêtement est rapporté sur les éléments résistants sans participer au travail d'ensemble.

Pour nous résumer, nous voyons donc la voiture d'après guerre pourvue d'une carrosserie-coque en bois ou en résine synthétique pour les petites voitures, en tôle d'acier embouti pour les voitures moyennes et en éléments d'alliage léger coulés et assemblés aussi bien pour les petites voitures que pour les plus importantes.

Le mécanisme

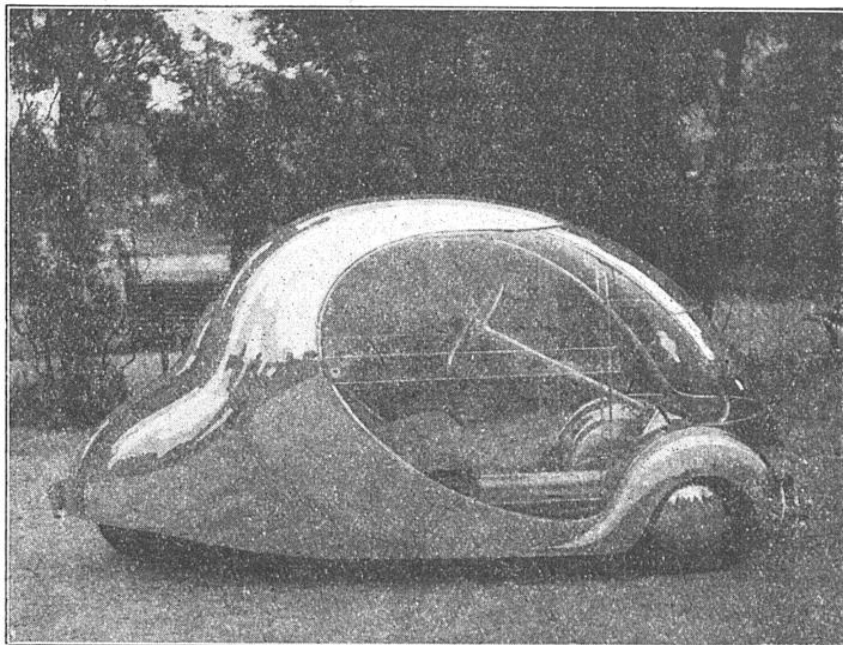
Sur cette poutre viendront s'assembler tous les éléments mécaniques, à savoir le moteur, l'embrayage et la boîte à vitesse, et ce qu'on est convenu d'appeler le « pont-moteur ».

Notre voiture comportera-t-elle des roues motrices à l'avant ou à l'arrière? La question vaut la peine qu'on s'y arrête un instant.

La solution par roues avant motrices, qui est d'ailleurs bien ancienne, a été mise en vedette par la Société Tracta, sous l'impulsion de MM. Fenaille et Grégoire. Les voitures de cette marque ont fait leurs preuves, non seulement dans la clientèle, mais plus encore et surtout dans des épreuves de vitesse et d'endurance. Rappelons que Tracta a été très longtemps un concurrent fidèle du Grand Prix d'Endurance

des 24 heures du Mans et qu'il a toujours fait figure plus qu'honorable.

Le grand public a été familiarisé avec la solution des roues motrices à l'avant grâce aux voitures Citroën; on a revendiqué pour cette construction des qualités dynamiques qu'elle procurait à la voiture. Je crois qu'il faut y voir surtout la recherche de la commodité de construction et d'accessibilité de la partie mécanique. En plaçant dans un groupe compact le



T W 4006

FIG. 1. — LA VOITURE DE VILLE DE DEMAIN AURA-T-ELLE CET ASPECT?

Sur cette voiture, on a recherché le maximum de visibilité pour la circulation en ville, en même temps qu'on lui a donné le poids le plus réduit. Cette voiture, actuellement équipée pour la propulsion électrique et appelée pour cela l'« œuf électrique », pèse 300 kg environ, peut atteindre la vitesse de 75 km/h et parcourir 120 km sans recharger ses accumulateurs.

moteur, l'embrayage, la boîte à vitesse et le pont-moteur à l'avant, on sépare complètement la carrosserie-coque d'une part, la mécanique d'autre part. Le bloc mécanique peut être très aisément et très simplement fixé à l'avant de la coque, laquelle ne comporte à l'arrière que les organes de fixation convenablement renforcés des roues porteuses. Le démontage et le remontage de toute la partie mécanique devient ainsi facile et rapide.

L'habitabilité de la voiture se trouve largement améliorée. On sait en effet qu'il est bien difficile, avec les voitures basses que la mode n'est pas seule à préconiser, de loger un arbre de transmission qui occupe l'axe du plancher depuis l'avant jusqu'à l'arrière.

On est obligé de prévoir pour lui un tunnel qui gêne les passagers, sans parler de la garde qu'il est nécessaire de prévoir entre le pont-moteur et le plancher arrière, ce qui oblige à surélever souvent plus qu'on ne voudrait le faire les sièges arrière et par là, la voiture tout entière.

Une autre solution qui donne apparemment les mêmes avantages constructifs que le « tout-à-l'avant », c'est le « tout-à-l'arrière ».

Cette solution a été utilisée voilà bien des années déjà sur la fameuse voiture allemande Rumpier, dite « goutte d'eau », en raison de sa forme. On la retrouve sur un modèle Mercedes, chez Tatra, ainsi que dans quelques autres constructeurs d'ailleurs assez rares, et enfin sur la fameuse petite voiture allemande populaire K.D.F. Si, au point de vue constructif, elle présente sensiblement les mêmes avantages que la solution du tout à l'avant, elle complique un peu la tâche de l'ingénieur pour deux points : le refroidissement du moteur qui ne bénéficie plus du courant d'air naturel dans lequel il est plongé à l'avant et, d'autre part, l'établissement des commandes depuis le siège

tons pas sur ce point que nous avons déjà effleuré dans la première partie de cet exposé.

Le quatre cylindres à carburateur paraît avoir encore de beaux et longs jours devant lui. Il a l'énorme avantage d'avoir bénéficié de longues études faites depuis que l'automobile existe et surtout d'avoir connu la sanction de l'usage. Est-ce à dire qu'il constitue le dernier mot du progrès? On aurait pu le croire il y a quelques années; on n'en est plus du tout persuadé maintenant, bien au contraire.

C'est qu'un nouveau venu a fait son apparition et commence déjà à se montrer sur le marché commercial (ou plutôt commencerait à se montrer s'il existait à l'heure actuelle vrai-

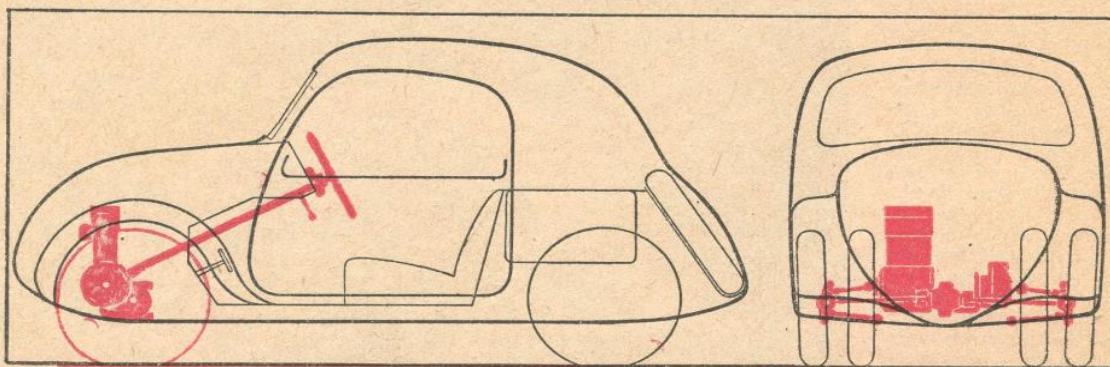


FIG. 2. — UN AVANT-PROJET DE TOUTE PETITE VOITURE (PROJET F. M.)

Le moteur à deux cylindres verticaux est disposé transversalement à l'avant du châssis, avec la boîte de vitesses et le différentiel. Les roues avant sont motrices et directrices. Les roues arrière sont rapprochées pour faciliter le carénage.

du conducteur jusqu'à l'extrême arrière du véhicule.

Enfin, avec le système du tout à l'arrière, les places arrière de la voiture deviennent quelque peu exposées au bruit.

Le groupe moteur-transmission

Si l'on groupe en un seul bloc toute la partie mécanique, on est amené à modifier quelque peu l'agencement considéré comme classique autrefois de chacun des ensembles. C'est ainsi que dans le « tout-à-l'avant », le pont moteur, c'est-à-dire le renvoi d'angle entre l'arbre longitudinal et les arbres transversaux se trouve placé entre le moteur et la boîte de vitesse, d'où la nécessité d'employer des arbres creux pour celle-ci.

La sacro-sainte prise directe de la boîte se trouve également dans certains cas supprimée pour des raisons de facilité de construction.

Notons en passant pour ne plus y revenir, que la prise directe, considérée autrefois comme indispensable parce que seule permettant un fonctionnement à peu près silencieux de la boîte de vitesse, est beaucoup moins nécessaire aujourd'hui où l'on sait mieux tailler les engrenages et surtout où l'on a pris l'habitude de les rectifier.

Le moteur

Que sera le moteur de la voiture de demain? Quelle que soit la taille de la voiture, petite ou grande, nous ne croyons pas qu'on puisse lui donner moins de quatre cylindres. N'insis-

ment un marché commercial). Nous voulons parler du moteur à carburation interne par injection.

Dans le moteur classique, l'air atmosphérique qui est aspiré par les pistons traverse, avant de pénétrer dans les cylindres, un appareil dénommé *carburateur* dans lequel il se charge de la quantité de combustible nécessaire. Ce qui sort du carburateur, c'est, non pas un mélange intime et homogène d'air et de vapeur de carburant, mais plutôt un mélange hétérogène d'air d'une part avec une faible proportion de vapeur d'essence et, d'autre part, des gouttelettes plus ou moins fines de carburant, qui restent en suspension dans l'air tant que celui-ci est animé d'une grande vitesse et ne vient pas frapper contre une paroi. Mais, ces gouttelettes ont une fâcheuse tendance à se déposer sur les parois de la tuyauterie d'aspiration où elles restent en quelque sorte collées sous forme d'une couche liquide plus ou moins épaisse. Cette couche liquide est entraînée par l'air qui circule à sa surface et c'est ainsi que le combustible arrive dans les différents cylindres. On conçoit aisément que, dans ces conditions, si bien fait qu'ait été le dosage en proportion correcte d'air et de carburant, ce dosage n'existe plus dès que les gouttelettes ont commencé à se déposer. Ce qui arrive dans le cylindre, c'est, d'une part, le courant rapide d'air chargé de vapeur et des gouttelettes les plus fines de carburant, et, d'autre part, la pellicule liquide qui chemine lentement le long des parois. La forme de ces parois joue donc un rôle très important dans la répartition du combustible dans les différents cylindres.

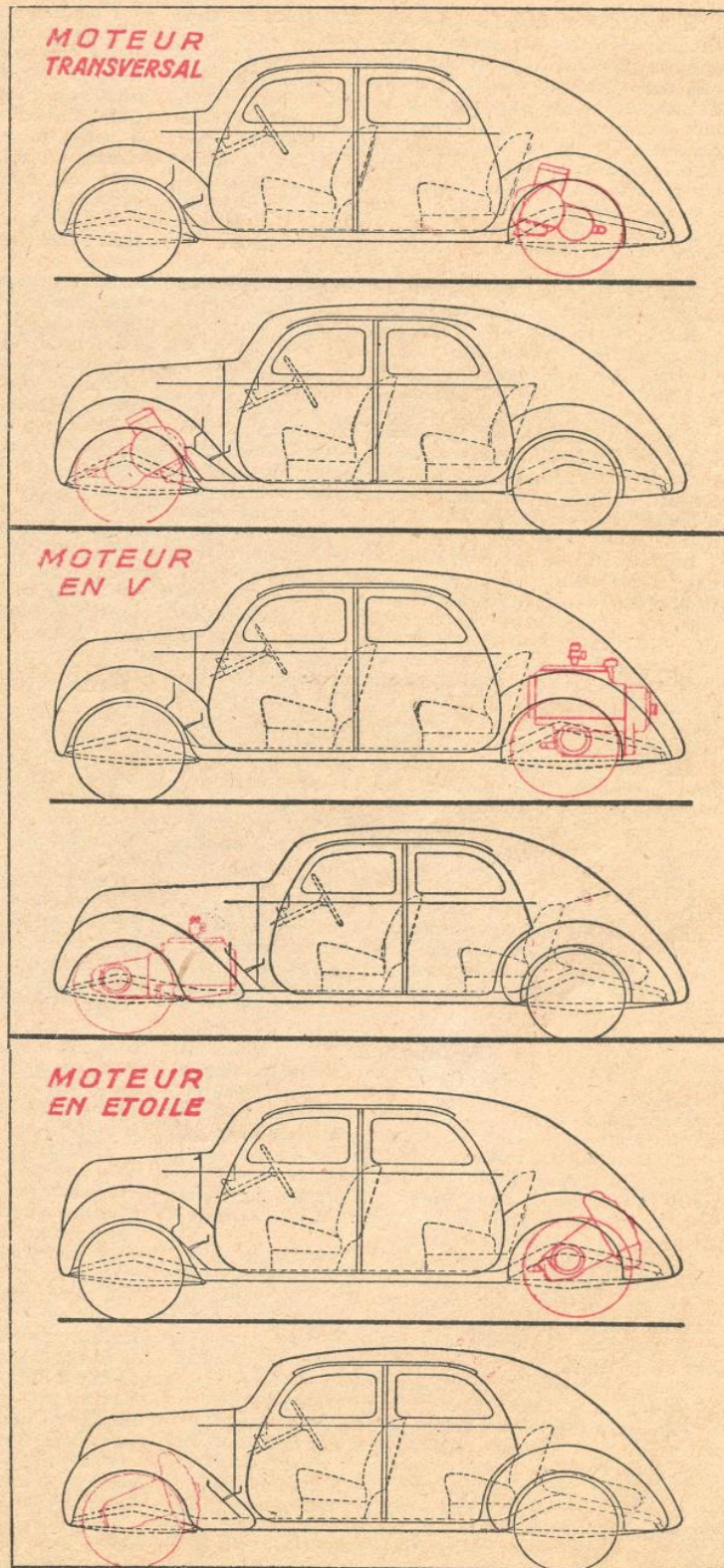
En effet, on constate toujours dans un moteur polycylindrique, quel qu'il soit, que certains cylindres reçoivent un mélange plus riche que la moyenne et d'autres un mélange plus pauvre. Or, il tombe sous le sens que pour que le moteur puisse tourner à peu près correctement, il faut que le cylindre le moins alimenté en combustible le soit au moins suffisamment. On est donc amené à augmenter la richesse générale de tout l'air qui a traversé le carburateur pour obtenir ce résultat : enrichir suffisamment le cylindre pauvre. Mais pendant ce temps, tous les autres cylindres se trouvent également enrichis, d'où mélange correct dans un ou deux des cylindres, mélange trop riche dans les autres, avec, comme conséquence immédiate, un gaspillage de combustible.

Dans le moteur à carburation interne au contraire, on admet dans les cylindres de l'air pur.

Au début du temps de la compression ou au cours de ce stade, on injecte dans chacun des cylindres le carburant à l'état liquide, mais au moyen d'injecteurs pulvérisateurs qui le réduisent en très fines gouttelettes.

FIG. 3. — QUELQUES DISPOSITIONS PROPOSÉES AUX ÉTATS-UNIS POUR LES TYPES « TOUT A L'AVANT » ET « TOUT A L'ARRIÈRE », DANS LESQUELLES LE MOTEUR ET LA TRANSMISSION FORMENT UN BLOC UNIQUE, PARTICULIÈREMENT COMPACT

Les deux voitures du haut comportent un moteur à cylindres en ligne, disposé transversalement. Lorsque ce moteur est à l'arrière, que ce soit avant ou après l'essieu, il peut compter jusqu'à six cylindres; lorsqu'il est à l'avant, il ne peut dépasser quatre cylindres, à cause de la largeur trop grande qu'il entraînerait pour le capot. Les deux voitures du milieu possèdent un moteur en V : pour l'une, le moteur, supposé à huit cylindres, est placé au-dessus de la boîte de vitesse et du différentiel, solution acceptable avec les roues arrière motrices, mais qui serait mal adaptée aux roues avant motrices, car le capot serait trop haut et gênerait la visibilité; pour l'autre, le moteur en V est disposé en arrière de l'essieu. Les deux dernières voitures sont dotées d'un moteur en étoile à sept cylindres placé dans les deux cas en arrière du différentiel. Ces exemples sont loin d'épuiser toutes les dispositions imaginables avec les types de moteurs utilisés. Encore pourrait-on songer à d'autres types, tels les moteurs en X ou les moteurs en éventail, que l'on peut considérer comme des demi-moteurs à cylindres en étoile.



L'expérience acquise dans la construction des moteurs Diesel a permis d'arriver à une très grande précision dans le dosage du débit de chaque élément de la pompe à injection, en même temps qu'elle nous a appris à pulvériser convenablement le combustible. Il en résulte qu'avec l'injection on peut, sans difficulté, obtenir un dosage identique entre l'air et le combustible dans chacun des cylindres. Ce mélange devient de plus en plus homogène à mesure que le piston monte en le comprimant et au moment où l'étincelle électrique l'allume, il brûle dans des conditions comparables à celle que l'on rencontre dans le moteur classique et même souvent meilleures.

D'autre part, le combustible étant envoyé sous forme liquide dans les cylindres, il s'y vaporise plus ou moins complètement, empruntant au milieu lui-même la chaleur nécessaire pour cette vaporisation.

La température de la masse au moment où l'étincelle va allumer est donc plus basse que dans le système à carburateur où, au contraire, on est obligé, pour améliorer la répartition, de réchauffer le mélange avant son introduction au cylindre.

Le résultat de cet abaissement de température se fait sentir par une double conséquence. D'abord, le mélange étant plus froid, sa densité est plus forte et la puissance spécifique du moteur se trouve donc augmentée, puisque le remplissage de chaque cylindre est amélioré.

D'autre part, la température au moment de l'allumage étant plus basse, les phénomènes de détonation se trouvent retardés; il est donc possible d'employer, pour un combustible déterminé, un rapport volumétrique plus élevé dans les moteurs à carburation interne que dans les moteurs à carburation externe.

On voit immédiatement la conséquence : amélioration concomitante du rendement et de la puissance spécifique.

Chaque fois, par conséquent, que dans un véhicule automobile, la consommation de carburant jouera un rôle important, on est porté à croire que le constructeur choisira un moteur à carburation interne. Pour les petites voitures, il en sera sans doute autrement pour des raisons d'économie et de simplicité. Quels que soient en effet les progrès faits dans la fabrication des pompes à injection et des injecteurs, l'équipement du moteur à carburation interne coûtera toujours beaucoup plus cher qu'un simple carburateur.

Résumons donc la formule générale. Petites et moyennes voitures : moteur à carburateur; grosses voitures : moteur à injection avec allumage électrique pour les carburants légers et peut-être Diesel pour les carburants lourds. Quant aux camions, ils resteront très certainement fidèles au moteur Diesel.

La recherche constante de l'allègement nous amènera certainement à voir augmenter le régime de rotation des moteurs. Ce n'est pas là un fait nouveau. L'augmentation progressivement constante de la vitesse de rotation des moteurs est un phénomène qui a existé et persisté depuis le commencement de l'automobile même.

Nous en sommes actuellement à peu près à 3 500 ou 4 000 tours par minute pour des moteurs de l'ordre de 2 litres de cylindrée. Dès avant la guerre, certains moteurs de prototypes dépassaient assez largement 5 000 tours. On ira beaucoup plus loin sans que personne songe à protester; les moteurs de course ne sont en effet pas tellement loin maintenant de 10 000 tours par minute.

Puisque nous parlons de moteurs de course, disons un mot d'un organe qu'ils utilisent tous, mais qui n'a pas encore conquis droit de cité sur les voitures particulières, à savoir le **compresseur**. Pour augmenter la puissance sans changer le régime de rotation du moteur, on cherche à faire entrer dans le volume limité de chaque cylindre une masse plus grande de gaz et pour cela on comprime l'air au lieu de le puiser directement dans l'atmosphère.

Le compresseur est un organe qui ne travaille pas gratuitement. C'est en effet au moteur lui-même qu'il emprunte l'énergie qui lui est nécessaire pour comprimer l'air et aussi pour vaincre ses frottements propres. Le rendement organique d'un compresseur est en général assez bas et dépasse rarement 0,6, tout au moins pour les compresseurs de voitures. C'est donc un serviteur onéreux. D'autre part, il n'est pas du tout prouvé que, si la puissance est augmentée grâce au compresseur, la consommation soit en même temps améliorée. C'est là un point très délicat qu'il est peut-être un peu hors de propos de vouloir étudier à fond ici, d'autant plus que l'accord est loin d'être fait entre techniciens sur cette importante question.

Ce qu'on peut retenir, c'est que le compresseur trouvera sans doute des applications sur les voitures de sport, mais que pour l'immédiat tout au moins, il ne peut être considéré comme faisant partie intégrale de la voiture de demain.

Embrayage et changement de vitesse

On pourrait croire que l'embrayage a atteint un stade à peu près définitif avec l'embrayage à disque unique fonctionnant à sec universellement employé depuis quelques années. Cependant, des nouveautés peuvent surgir et même ont surgi. La voiture de demain pourrait fort bien avoir un embrayage centrifuge. Ce n'est pas là, dira-t-on, une nouveauté, puisque cet appareil est connu depuis une vingtaine d'années déjà, mais il présentait des défauts qui ont rendu son emploi pratiquement impossible. Un perfectionnement important, qui lui a été apporté récemment, pourrait bien favoriser un nouveau lancement. Il s'agit d'un encliquetage électromagnétique associé à l'embrayage centrifuge.

L'ensemble possède les mêmes qualités d'automatisme que l'embrayage centrifuge, mais permet cependant le débrayage instantané et sans effort quel que soit le régime du moteur. Nous le verrons très bien sur la voiture de luxe de demain.

D'ailleurs on peut prévoir aussi qu'en raison des progrès effectués dans la construction des embrayages électromagnétiques qu'on se passe d'embrayage en adoptant la boîte de vitesse électromagnétique qui possède en elle-même autant d'embrayages qu'il y a de combinaisons de vitesses.

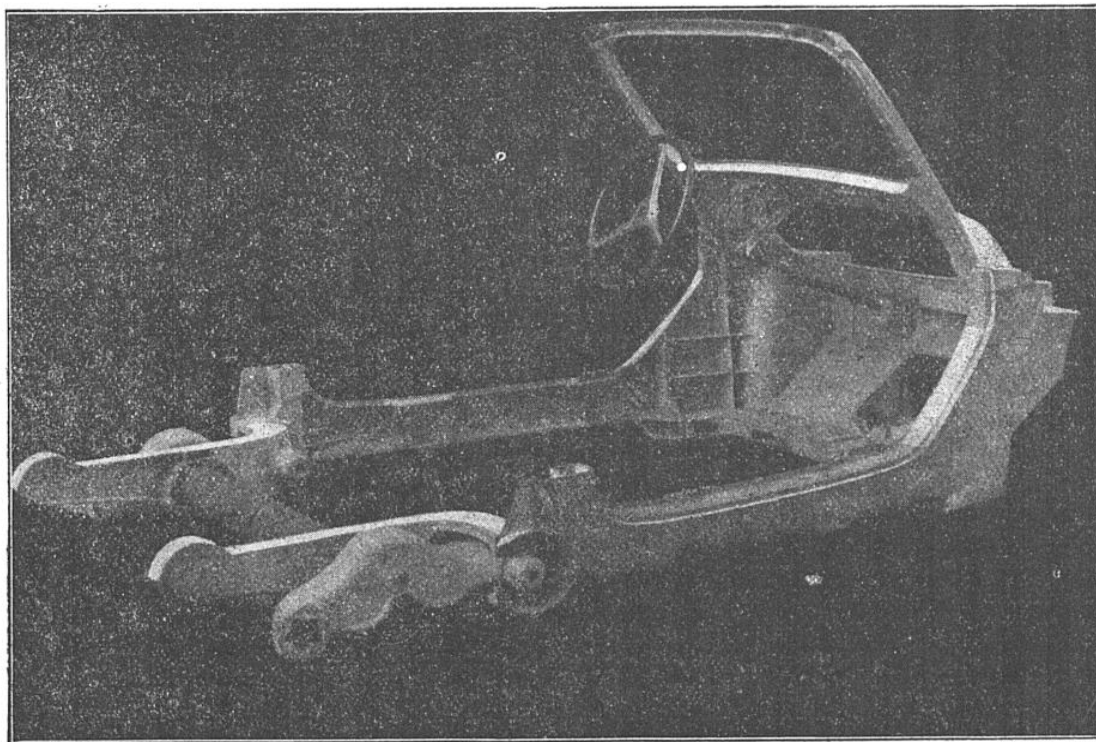
Quant au changement de vitesse, il subira certainement, dans les années qui viennent, des modifications importantes.

Il est absolument nécessaire que, même dans l'avenir immédiat, la commande du changement de vitesse soit simplifiée et rendue tellement facile qu'un conducteur maladroit soit dans l'impossibilité complète de faire une fausse manœuvre. Une solution a été réalisée, qui donne déjà entièrement satisfaction à ceux qui l'utilisent, à savoir la boîte électromécanique Cotal. Avec elle, il n'est pas plus difficile de changer de vitesse que de changer la position de la manette d'avance. Mais n'ira-t-on pas plus loin

en supprimant complètement la commande de la boîte et en rendant celle-ci automatique? Personnellement, nous croyons à l'avenir du changement de vitesse automatique qui deviendra indispensable quand l'automobile sera l'instrument de travail de tout le monde.

On fait, au changement de vitesse automatique deux grosses objections de principe. La première, dont nous allons faire toute de suite justice, c'est qu'il est plus compliqué que le changement de vitesse commandé. A notre avis,

Il n'est pas douteux en effet que le changement de vitesse automatique ne puisse agir exactement comme le ferait le conducteur; une raison évidente réside dans le fait que si l'on prend deux conducteurs quelconques, qu'on leur fasse parcourir un itinéraire déterminé sur une voiture également déterminée, à des allures variables et au gré de chacun d'eux, ils ne manœuvreront pas leur changement de vitesse aux mêmes moments. On peut dire qu'autant il y a de conducteurs, autant il y a de façons de se



T W 40069

FIG. 4. — UNE CARCASSE DE VOITURE AUTOMOBILE EN ALPAC

Cette carcasse est constituée par un certain nombre de pièces coulées en Alpac, qui ne nécessitent avant montage qu'un usinage extrêmement réduit. Ces pièces sont, en effet, assemblées l'une sur l'autre au moyen de boulons, de telle sorte qu'il suffit d'usiner les plans de joints pour les rendre immédiatement utilisables. L'ensemble de la voiture comporte une pièce formant bouclier à l'avant, pièce qui supporte la direction et tout le bloc-moteur, de même que la suspension des roues avant motrices. Au-dessus vient se boulonner une deuxième pièce qui constitue à la fois l'avant et le cadre du parebrise dont les éléments latéraux forment le montant de la carrosserie. A droite et à gauche du bouclier se boulonnent les bas de portes qui remplacent les longerons. Ces éléments sont réunis à l'arrière au moyen d'un gros tube qui complète le bâti et supporte la suspension arrière.

cette objection n'a pas de valeur, car la loi inexorable du progrès veut que tout progrès soit acheté au prix d'une complication dans la construction, si cette complication apporte une simplification dans la manœuvre et l'utilisation. Or, c'est précisément le cas pour l'automatisme de la boîte de vitesses.

La seconde objection a peut être plus de valeur. On reproche au changement de vitesse automatique de ne pas fonctionner tout à fait de la même manière que le désirerait un conducteur habitué au changement de vitesse manuel, et c'est cette objection qui a fait rejeter au moins en France et sur le continent, tous les systèmes proposés de changements automa-

servir du changement de vitesse. On peut même aller plus loin : un même conducteur, sur un même itinéraire et avec la même voiture ne se servira pas de son changement de vitesse dans les mêmes conditions un jour déterminé et le lendemain.

Tout cela est incontestable. Mais l'automobile, nous l'avons dit, est de plus en plus un instrument utilitaire destiné à tout le monde.

Or, tout le monde ne sait pas manœuvrer convenablement un changement de vitesse; n'oublions pas en effet (ce qu'on a trop de tendance à faire), que le changement de vitesse n'est qu'un remède destiné à masquer un défaut très grave du moteur à combustion interne dont le couple est à peu près invariable. Si nos voi-

tures avaient eu des moteurs à vapeur ou des moteurs électriques, il est probable que le changement de vitesse n'aurait jamais existé, au moins sur les petits véhicules. Mais, nous nous sommes tellement habitués à ce défaut — car c'est un défaut — du moteur à explosion, que maints conducteurs trouvent de l'agrément à mettre cette imperfection en relief. Une belle manœuvre de changement de vitesse permet au conducteur de montrer sa virtuosité et il tient par conséquent à pouvoir manœuvrer à son gré son levier traditionnel.

Il est vrai, d'autre part, qu'une mauvaise manœuvre du changement de vitesse révèle la

Les freins

Quand le hasard vous permet de conduire actuellement une voiture d'avant 1914 laquelle, comme on le sait, ne possédait à l'époque que des freins sur le train arrière, ce qui frappe le plus c'est précisément l'insuffisance de ses freins. Ceux qui ont suivi le développement du freinage depuis le début de l'automobile comprennent pourquoi les freins actuels sont si éloignés des freins d'autrefois. Et on est tenté parfois de conclure que nos freins approchent la perfection de très près.

Tel n'est pas notre avis, car s'ils sont infini-

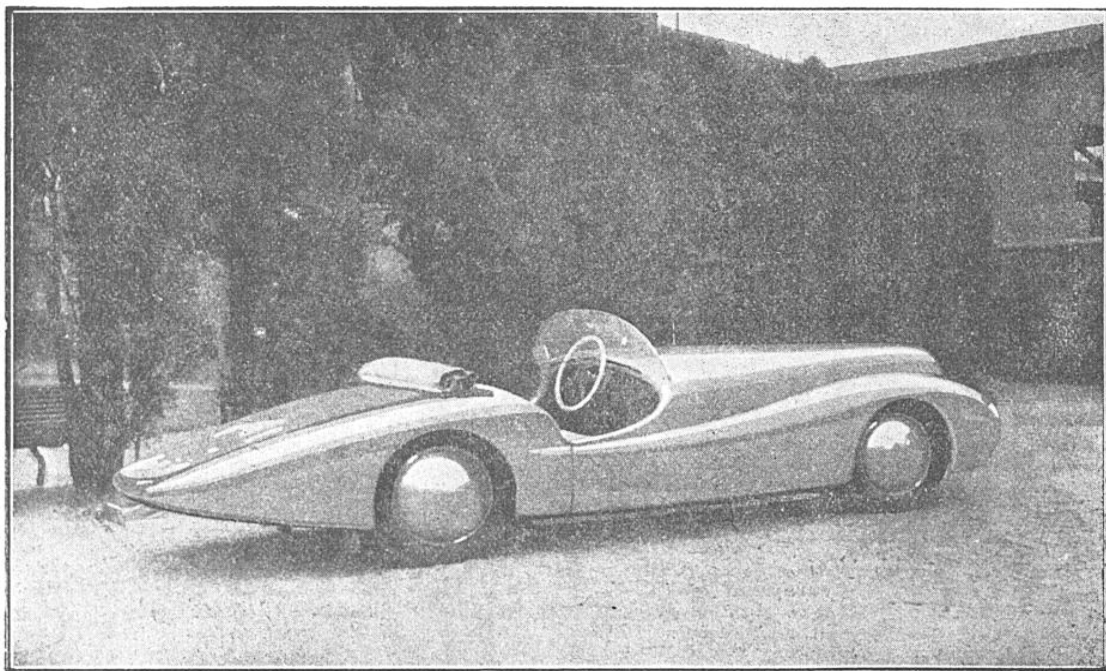


FIG. 5. — UNE GRANDE VOITURE SPORT ALLÉGÉE AU MAXIMUM

Cette voiture est actuellement équipée pour la traction par accumulateurs, chaque roue porte la même charge. Toutes les batteries sont dans la partie basse et réparties sur le devant, les côtes et l'arrière. Un chargeur oxygéné se trouve à bord permettant la charge sur 110 volts, 220 volts ou sur courant continu. Le châssis de la voiture est formé par deux longerons métalliques; la carrosserie, entièrement démontable, est en alliage léger et pèse seulement 20 kg. La voiture complète pèse 1 560 kg. La voiture possède huit vitesses : en quatrième vitesse, la voiture roule à 35 km/h, la capacité des batteries étant alors de 840 ampères-heure, ce qui lui donne dix heures de marche, soit plus de 300 km sans recharge. En huitième vitesse, on atteint 65 à 75 km/h, la décharge plus rapide diminue la capacité des accumulateurs, et la durée de marche est réduite à 3 h 40 environ, la distance pouvant être comptée autour de 220 km.

maladresse ou la perte de sang-froid du conducteur. Si donc, on veut juger sainement de la valeur du changement de vitesse automatique, il faut le mettre dans les mains de gens qui ne savent pas conduire, ou plutôt qui ne connaissent de la conduite que la manœuvre élémentaire du volant et des freins. Or, ces gens, ce sont précisément les acheteurs de la voiture de demain.

Le changement de vitesse automatique leur épargnera cette manœuvre que beaucoup d'entre eux redoutent.

Et, bénéfice plus important encore, ce changement de vitesse convenablement étudié permettra une utilisation plus économique de la voiture, ce qui est un point que nous n'avons pas le droit de négliger.

ment supérieurs aux freins d'avant 1914, ils doivent encore recevoir des améliorations importantes.

Quelques critiques nous montreront la voie dans laquelle les freins peuvent être améliorés. Nos freins actuels ont une commande trop dure : quand on a eu l'occasion de conduire assez longtemps une voiture munie d'un bon servofrein qui agit pour une pression très modérée sur la pédale, on est long à se réhabituer aux freins normaux dont la mise en action exige un effort qu'on trouve anormal. Comment réaliser cette amélioration? C'est aux techniciens qu'il appartient de le faire. Certains procédés existent dès maintenant qui sont très peu utilisés, sans doute pour des raisons d'économie et peut-

être aussi d'un peu de paresse. Voici par exemple les freins hydrauliques qui exigent, au moins pour les grosses voitures, vous affirment tous les constructeurs, une grande course à la pédale : inconvénient certain, puisque le conducteur est obligé, pour passer de la pédale d'accélérateur à la pédale de frein, de soulever et de transporter latéralement toute la jambe droite alors que si les deux pédales étaient sensiblement au même niveau le talon n'aurait pas à quitter le plancher.

Or, il existe des dispositifs à pistons différentiels qui permettent d'obtenir une action rapide pendant que les segments se rapprochent des tambours et qui au contraire, donnent une très grande démultiplication au moment où il faut exercer une pression entre les surfaces pour arrêter la voiture.

Grâce à eux, la course de la pédale peut être diminuée, l'effort à exercer également et l'action de freinage augmentée.

Les freins hydrauliques, si parfaits soient-ils, présentent toujours un certain danger en cas de défaillance d'une canalisation ou même d'un piston du maître-cylindre ou du cylindre récepteur. Il existe pourtant des systèmes de freinage à double cylindre grâce auxquels, si un tel accident arrive, il reste au moins deux roues complètement freinées.

Les servofreins mécaniques ont donné des résultats remarquables tant du point de vue puissance de freinage que douceur de commande. On ne les utilise plus pratiquement sur les voitures particulières où l'on se contente soit des commodités que donne le freinage hydraulique, soit du système Perrot-Bendix à déroulement.

Et, cependant, ce système, si étudié soit-il, n'est pas encore l'idéal de ce qu'on peut espérer. Un léger dérèglement le rend insuffisamment progressif. Or, la progressivité et la précision sont deux qualités indispensables pour des freins.

Nous espérons donc fermement que la qualité des freins de la voiture de demain sera encore améliorée, ne serait-ce que dans la facilité de réglage qui ne devrait pas exiger du conducteur des contorsions pour atteindre des éléments d'ailleurs malpropres, dissimulés en un point où ils sont presque invisibles. Il faut reconnaître que les freins actuels nous donnent à peu près complètement la sécurité. Ils ne nous donnent pas suffisamment l'agrément complet de conduite.

Suspension et tenue de route

Sur ces questions, il y a beaucoup à faire. L'amortisseur, élément indispensable de la suspension, doit être en quelque sorte intégré aux ressorts et non pas étudié indépendamment d'eux. Là encore, on vise trop à l'économie de prix de revient. Il existe des systèmes d'amortisseurs excellents, mais évidemment chers, tout au moins dans la construction de petite série. Rappelons les suspensions utilisées sur les voitures Rolls et Bentley : amortisseurs à huile dont l'action varie automatiquement avec la vitesse de la voiture et peut être même corrigée par une manette à la disposition du conducteur. C'est du grand luxe dira-t-on ? Est-ce véritablement du grand luxe que de chercher à augmenter le confort et à diminuer la fatigue des occupants d'une voiture ?

Equipement électrique

Avant d'en terminer avec l'examen d'ensemble que nous avons fait de la voiture de demain, nous tenons à dire un dernier mot à propos de l'équipement électrique.

La voiture automobile comporte une véritable usine électrique avec sa centrale (dynamo et ses appareils de régulation), sa station de réserve (batterie d'accumulateurs) et ses appareils d'utilisation (démarreurs, phares, essuie-glace, etc.). Certains de ces éléments sont très loin encore de la perfection à laquelle ils devront prétendre.

Les dynamos actuelles à réglage par troisième balai sont heureusement en voie de disparition chez nous, après avoir pratiquement disparu déjà dans bien d'autres pays. La voiture de demain aura certainement une dynamo à régulateur de tension qui, seule, permet de charger les accumulateurs quand ils en ont besoin, sans les surcharger quand cela n'est pas nécessaire.

Les batteries dont la qualité était à peu près passable avant la guerre et qui sont devenues nettement mauvaises en raison de la pénurie de matières premières, retrouveront, espérons-le, les traditions d'antan. Mais, il faudra que les constructeurs acceptent de dépenser un peu plus pour une batterie de plus forte capacité. Nous n'osons pas affirmer que la voiture de demain aura un système de démarrage tel qu'on soit certain de mettre le moteur en route à la première sollicitation, quelle que soit la température et quelles que soient les conditions où on l'utilise.

Répétons-le une fois de plus, l'automobile de demain sera l'instrument de travail de tout le monde. Or, « tout le monde » ne doit pas avoir à faire des études spéciales ni à connaître des tours de main qui permettent de démarrer quand l'équipement électrique est défaillant.

Il resterait beaucoup à dire encore sans doute sur les améliorations que pourrait et, nous dirions volontiers, que devrait comporter la voiture de demain. Nous nous sommes bornés aux choses principales et essentielles. On voit assez nettement et dès maintenant ce qu'il faudrait à cette voiture pour qu'elle soit très supérieure à la construction ancienne (entendant par construction ancienne celle qui s'est terminée en 1939). Mais il n'est pas certain que l'effort nécessaire sera fait pour arriver à ce degré de progrès. Si le dessin de la voiture sera, comme nous l'espérons, amélioré, il sera indispensable aussi que les préoccupations de qualité soient, même chez le constructeur, au tout premier plan. La France ne peut en effet espérer lutter contre l'importation étrangère par l'importance de sa fabrication. Quoi qu'il arrive, la voiture construite en France sera toujours, à qualité égale, nettement plus chère que la voiture construite aux États-Unis. C'est un fait d'ordre naturel, auquel nous ne pouvons apporter aucun changement. Mais ce que nous pouvons faire (et ce que nous devons faire) c'est chercher à améliorer la qualité jusqu'à un point tel que, si nos voitures sont plus chères que les voitures importées, elles soient aussi meilleures. De cette façon seulement, notre industrie pourra retrouver dans le monde la place qu'elle a autrefois occupée et qu'elle a perdue depuis quelque trente ans.

Henri PETIT.

L'EXPLOITATION INDUSTRIELLE DE LA CHALEUR TERRESTRE

LA pénurie de combustibles naturels en Italie a orienté depuis longtemps les chercheurs vers la mise en exploitation de sources d'énergie de nature diverse. On sait en particulier l'essor pris dans ce pays par les installations hydrauliques, malheureusement localisées dans les régions montagneuses favorables, tandis qu'une grande partie de la péninsule, comme aussi la Sicile, se trouvent désavantagées du point de vue énergétique, ce qui n'est pas sans avoir de graves répercussions sur le développement industriel de ces régions, ainsi que sur leur productivité agricole, par suite des faibles possibilités d'irrigation. « Science et Vie », d'autre part (1), a déjà signalé l'utilisation, en Toscane, de la vapeur à haute température qui s'échappe des « soffioni » et qui alimente d'importantes installations, en particulier à Larderello. Nous n'y reviendrons pas ici. Si elles sont à l'heure actuelle les plus développées, elles sont loin cependant d'épuiser les possibilités du sol italien où l'exploitation industrielle de la chaleur terrestre apparaît particulièrement favorable étant donné le caractère volcanique très accusé du relief de la péninsule.

C'est ainsi que des essais (2) étaient en cours il y a quelques mois dans la région de Naples, pour récupérer la chaleur naturelle des sources thermales, ainsi que dans les nombreuses îles du voisinage, absolument dénuées de toute espèce de combustible, où, en creusant le sol, on trouve à faible profondeur des nappes d'eau chaude, susceptibles d'alimenter une petite centrale. Une première station était en fonctionnement depuis un an environ, suivant le principe de la figure

ci-jointe. Sa puissance ne dépassait pas 10 ch, mais une de 250 kW était en construction.

On remarquera que le fluide moteur est ici du chlorure d'éthyle, circulant en circuit fermé entre une source chaude et une source froide constituées toutes deux par des échangeurs de températures. La source chaude reçoit l'eau chaude de la source thermale, à la température de 90° C dans l'installation d'essai en question, et la source froide de l'eau de mer à 20° C. La source chaude pourrait aussi bien recevoir de l'eau chaude d'origine différente, par exemple l'eau d'un puits artésien ou l'eau de refroidissement d'un moteur Diesel.

Les premières prospections de sources thermales appropriées et de nappes chaudes utilisables n'ont porté que sur la région du Vésuve. Il est probable qu'on en trouvera également en Sicile, dans la région de l'Etna. Ainsi la chaleur

du sol volcanique apportera une contribution non négligeable à l'économie italienne en matière d'énergie, grâce à un équipement qui apparaît aujourd'hui parfaitement réalisable techniquement.

On ne saurait en dire autant d'un plan audacieux qui ne vise à rien moins que capter directement la chaleur du Vésuve. Il comporte le percement d'une galerie latérale entre le volcan éteint de Monte Somma, près d'Atrio del Cavallo, et le

cratère du Vésuve. Cette galerie atteindrait la galerie principale à 80 ou 100 m de l'orifice, et six conduites de 4 m de diamètre permettraient de soutirer les gaz à haute pression qui accompagnent la montée de la lave. Après récupération des produits chimiques de valeur qu'ils contiennent, ces gaz alimenteraient une centrale thermique. La réalisation de ce dernier projet n'est sans doute pas pour demain.

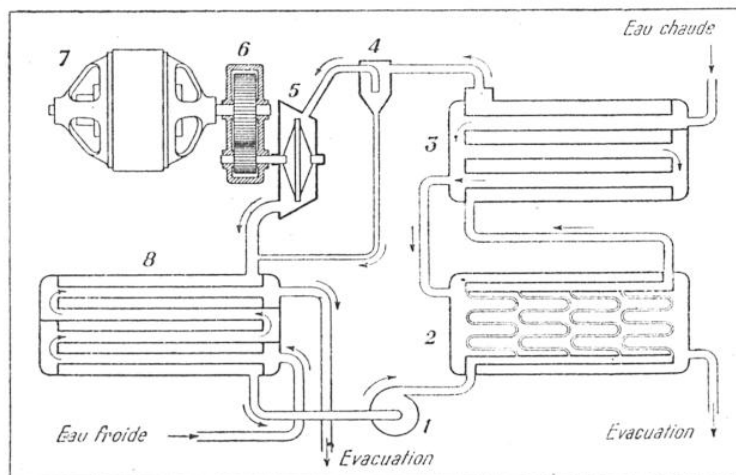


FIG. 1. — SCHÉMA DE L'INSTALLATION EXPÉRIMENTALE DE 10 CH POUR L'EXPLOITATION D'UNE SOURCE THERMALE

Le fluide moteur — du chlorure d'éthyle — circule en circuit fermé. Il est envoyé par la pompe 1 au réchauffeur 2, puis à l'échangeur de température 3, parcourus tous deux en sens inverse par l'eau chaude de la source thermale. Le chlorure d'éthyle vaporisé parvient à un séparateur centrifuge 4, puis actionne la turbine 5. Celle-ci entraîne, par l'intermédiaire du réducteur 6, la génératrice 7. Le chlorure d'éthyle détendu arrive au condenseur où il est repris à l'état liquide par la pompe de circulation. Il recommence alors le cycle.

(1) Voir Science et Vie, n° 290, page 214.

(2) « Elektrizitätswirtschaft », t. XL, et « La Technique Moderne », t. XXXV, n° 56.

LES A CÔTÉ DE LA SCIENCE

INVENTIONS, DÉCOUVERTES ET CURIOSITÉS

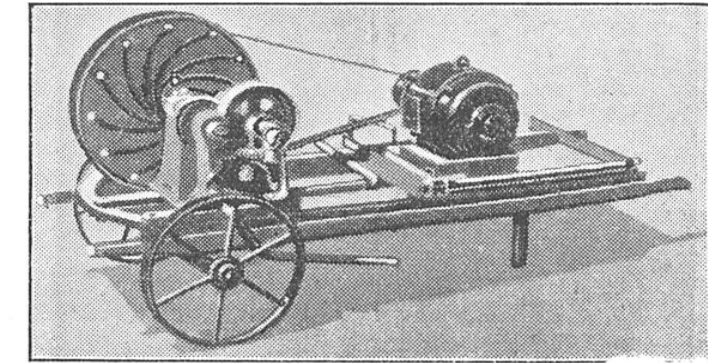
par V. RUBOR

Une nouvelle "poulie extensible"

ENTRE un moteur à vitesse constante et une machine entraînée à vitesse variable doit être intercalé un dispositif cinématique de variation de vitesse : il ne faut pas chercher plus loin la raison du grand nombre de « variateurs de vitesse » qui sont venus enrichir depuis quelques années l'arsenal de la mécanique.

Nous signalerons aujourd'hui à l'attention de nos lecteurs un système de transmission à vitesse variable par courroie plate ou trapézoïdale et « poulie extensible » dû à M. E. Gaisset et qui rencontre dans les milieux techniques un intérêt certain, du fait de sa grande simplicité.

On connaît la propriété qu'a la spirale « logarithmique » de couper tous les rayons vecteurs sous un angle constant. Deux spirales inversées de même centre et où l'angle constant est de 45° se coupent sous un angle droit; mais, d'autre part, en imprimant à l'une des deux spirales un déplacement angulaire par rapport à l'autre, on rapproche ou on éloigne du centre leur point d'intersection. Cette double propriété est utilisée dans la poulie Gaisset : la seconde pour régler



T W 40071

FIG. 2. — « BROUETTE AGRICOLE » ÉQUIPÉE AVEC LA POULIE EXTENSIBLE

le diamètre, la première pour assurer la position des « éléments de jante », c'est-à-dire des éléments qui forment la jante de la poulie sur laquelle passe la courroie de transmission.

Ces éléments, au nombre de douze sur la figure 1 sont maintenus à égale distance de l'axe par un système de quatre disques en tôle d'acier, dont deux, numérotés 1, limitent la poulie perpendiculairement à l'axe, et sont calés sur un tube d'acier 2 qui constitue le moyeu de la poulie. Les deux autres disques, 3, sont calés sur un deuxième tube 4 enfilé sur le tube 2 sur lequel il tourne librement.

Les disques 1 sont percés de fenêtres étroites 5 en forme de spirale logarithmique. Les disques 3 également de fenêtres semblables 6 mais de courbure opposée. Les éléments formant la jante de la poulie sont engagés par leurs extrémités dans l'intervalle laissé libre au croisement de deux fenêtres 5 et 6.

Les fenêtres des disques sont régulièrement espacées et la largeur d'une fenêtre est constante.

Les disques 1 étant calés bien en face l'un de l'autre sur le moyeu 2 et les disques 3 clavetés également bien en face l'un de l'autre

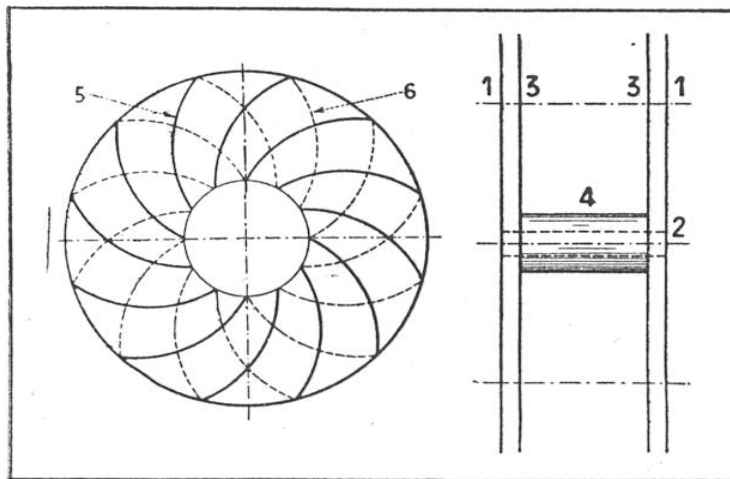


FIG. 1. — FACE ET PROFIL DE LA POULIE EXTENSIBLE

1, disques extérieurs calés sur le moyeu 2 de la poulie; 3, disques intérieurs calés sur le tube 4 tournant librement sur le moyeu 2; 5, rainures-fenêtres en spirale logarithmique des disques 1; 6, rainures-fenêtres des disques 3.

sur le tube 4, il est clair que le déplacement angulaire de l'ensemble tube 4 et disques 3 par rapport à l'ensemble moyeu 2 et disques 1 entraînera un éloignement ou un rapprochement égal de tous les éléments de jante par rapport à l'axe.

Ces éléments sont guidés à leurs extrémités par les couliasses constituées par le croisement de deux fenêtres et ce croisement est pour toutes les fenêtres à la même distance de l'axe.

La cage d'écureuil formée par les douze éléments de jante sera donc de diamètre variable.

De plus, pendant la rotation et pendant la rétraction ou l'extension de la poulie, aucun élément de jante ne subira de rotation par rapport au disque, les bouts carrés des éléments de jante étant maintenus dans les croisements « carrés » des spirales.

Suivant le mode de fonctionnement cherché, la poulie peut être fixée à tout diamètre voulu, ou au contraire laissée libre de chercher son diamètre sous l'action de la force centrifuge. On peut réaliser ainsi le démarrage à couple constant, à couple progressivement croissant, etc., uniquement

par des modifications de détail portant sur l'agencement mécanique.

Cette intéressante nouveauté a déjà reçu de nombreuses applications et plus particulièrement dans le textile (rameuses, métiers à tisser). Une des plus indiquées semble l'adaptation à la « brouette agricole », qui, comme on sait, doit pouvoir entraîner les diverses machines de l'agriculteur aux vitesses les plus variables, depuis le coupe-racines jusqu'à la scie à buches. Mais là ne se limite pas le champ d'application de cet organe qui pourrait bien prendre place parmi les dispositifs classiques de la cinématique.

L'influence solaire ou cosmique en biologie végétale

ON a constaté depuis longtemps l'influence de la variation undécennale de l'activité solaire sur les récoltes, le niveau des lacs, etc. D'autres phénomènes restent étrangers à cette variation périodique, mais semblent traduire l'influence de caractéristiques exception-

nelles présentées à certains moments par le rayonnement solaire ou cosmique sans qu'on puisse jusqu'ici en préciser la nature. Tel est, selon M. Esclagon, le cas de la floraison du bambou noir du Japon (*Phyllostachis nigra*). Les bambous du genre *Phyllostachis* ont été introduits dans les régions les plus variées du globe. Ils présentent la particularité de ne fleurir qu'à des intervalles longs, irréguliers, et n'obéissant à aucune loi apparente. Les floraisons des bambous noirs sont particulièrement rares, et peuvent être espacées de plus de soixante ans. Or, on a noté en 1933 cette circonstance curieuse que les bambous noirs ont fleuri simultanément dans toutes les parties du monde, comme si une cause spéciale avait exercé une action hautement spécifique sur tous ces végétaux, sans distinction d'âge et indépendamment de la diversité des régimes météorologiques auxquels ils ont été soumis. On cherche — en vain jusqu'à présent — à préciser la nature du phénomène qui a provoqué, « de l'extérieur », cette floraison massive et synchrone.

NUMÉROS DISPONIBLES

Nous pouvons fournir à nos lecteurs :
Tous les numéros, du n° 46 au n° 317.

SAUF :

90, 104, 107, 114, 116, 129, 144, 166, 176, 189, 193, 200, 201, 204, 210, 213, 217, 222, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 240, 244, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 263, 264, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 282, 287, 288, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 312, 313, 314, 315.

Envoyer exclusivement par chèque postal au C.C. Postal Toulouse 184.05 :

— 10 francs par exemplaire commandé pour les numéros ordinaires;
— 20 francs pour les numéros spéciaux : 280, 284.

Nous nous réservons le droit de rembourser les lecteurs dont les commandes ne pourront être assurées, par suite de l'épuisement du stock.

Pour être sûr de lire régulièrement SCIENCE ET VIE, abonnez-vous :

	France	Etranger
Envois simplement affranchis.....	110 francs	200 francs
Envois recommandés.....	140 —	250 —

Tous les règlements doivent être effectués par chèque postal : 184.05 Toulouse. — Nous n'acceptons pas les timbres-poste.

Prière de joindre 3 francs pour les changements d'adresse.

La table générale des matières n° 1 à 186 (1913-1922) est expédiée franco contre 25 francs.

SACHEZ VOIR PLUS LOIN..

Que le présent

JEUNES GENS...

Ne vous laissez pas décourager par les sombres perspectives du moment...
Tout n'a qu'un temps...

SEUL CAPITAL INDESTRUCTIBLE,
L'INSTRUCTION DEMEURE !
APPRENEZ UN BON METIER DANS
LA RADIO, VOUS ASSUREREZ AINSI
VOTRE AVENIR... POUR DEMAIN
A temps perdu, sans rien changer à vos
occupations, où que vous puissiez être.

NOS COURS SPECIAUX
— sur place ou —
PAR CORRESPONDANCE
vous donneront le maximum de chances
aux examens officiels.

N'hésitez pas à nous demander conseil, il
vous sera répondu par retour du courrier.



CONTRE
5F

NOTRE GUIDE
COMPLET
DES CARRIERES
DE LA RADIO
EN 2 COULEURS

ECOLE DE RADIOELECTRICITE ET DE TELEVISION

15, RUE DU DOCTEUR BERGONIE

LIMOGES. (H.V.) C.C.P. 406.05

PUB. R. DOMENACH, MOSP.

BUREAU D'ETUDES
SCIENTIFIQUES et tech-
niques cherche pour son
SERVICE de PHYSIQUE,
comme collaborateurs, des
INGENIEURS connaissant
bien l'industrie française
et les centres scientifiques
pour compléter sa docu-
mentation.

ÉCRIRE :

SERVICE TECHNIQUE

18, rue Quentin-Bauchart, PARIS (8°)

LA BLAGUE A TABAC
Fa-cile

TIREZ...
S'OUVRE & RESTE
LARGEMENT
OUVERTE

en un clin d'œil

APPUYEZ...
SE FERME
HERMETIQUEMENT

RIEN DE PLUS SIMPLE
RIEN DE PLUS PRATIQUE

PRODUCTIONS **A. LAMARTHE** 12 RUE CHARLOT
PARIS (3°)

DÈS QUE LA SITUATION LE PERMETTRA, LA FABRICATION
REPRENDRA EN GRANDF SERIE.



L'ÉCOLE INTERNATIONALE PAR CORRESPONDANCE DE DESSIN ET DE PEINTURE

11, Avenue de Grande-Bretagne, 11
PRINCIPAUTÉ DE MONACO

VOUS OFFRE GRATUITEMENT
un très bel album traitant du Dessin et de la Peinture, sous toutes ses formes et qui vous renseignera en détails sur les passionnantes carrières auxquelles vous pourrez prétendre lorsque vous serez un Artiste. Vous y verrez aussi comment vous pouvez apprendre chez vous le Dessin et la Peinture, quel que soit votre milieu, le degré de votre culture et l'endroit que vous habitez. Et ceci grâce à l'enseignement **sérieux**, agréable et **remarquablement efficace** de la plus grande École actuelle des Arts Graphiques. Pour recevoir rapidement cet Album, sans engagement de votre part, découpez le bon ci-dessous en y joignant votre nom et votre adresse ainsi que 5 frs à votre gré pour frais de poste et adressez aujourd'hui même votre lettre à l'École Internationale (Service D.C. Renseignements.)

BON POUR UN ALBUM GRATUIT



JEUNES GENS

EN SUIVANT NOS COURS PAR CORRESPONDANCE, VOUS POUVEZ DEVENIR :

- 1° MONTEUR D'INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES (diplôme délivré par l'État français).
- 2° MONTEUR-DÉPANNÉUR RADIO-TECHNICIEN.
- 3° CHEF MONTEUR-DÉPANNÉUR RADIO-TECHNICIEN.
- 4° SOUS-INGÉNIEUR RADIO-ÉLECTRICIEN.
- 5° CONTRÔLEUR DES INSTALLATIONS ÉLECTRO-MÉCANIQUES.
- 6° SOUDEUR AUTOGÈNE (diplôme délivré par l'État français).
- 7° CHEF SOUDEUR AUTOGÈNE.
- 8° DESSINATEUR EN CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES (diplôme délivré par l'État français).
- 9° CHEF DESSINATEUR INDUSTRIEL.

La possession de l'un de ces diplômes vous ouvrira de magnifiques carrières dans l'Industrie, l'Aviation, la Marine et dans les GRANDES ADMINISTRATIONS d'ÉTAT.

Placement assuré des élèves diplômés.

Demandez, aujourd'hui même, tous les renseignements gratuits en spécifiant la préparation qui vous intéresse à

L'ÉCOLE PROFESSIONNELLE SUPÉRIEURE
51, boulevard Magenta - PARIS (X^e)

DEVENEZ CINEASTE !



Demandez notre documentation et le tableau synoptique de l'Industrie du Cinéma contre la somme de 10 francs pour tous frais à l'

ÉCOLE TECHNIQUE DE CINÉMA
de FRANCE-PRODUCTIONS
S. A. AU CAPITAL DE 9.000.000 DE FRANCS
2, BOULEVARD VICTOR-HUGO - BUREAU 28
NICE (A.-M.)

**ÉCOLE TECHNIQUE DE
CINÉMA**

Imprimerie Régionale, I.C.O. 31.2658. T.W. 12.164. - 24-1-1944. Le gérant : L. LESTANG.

LA RADIO *manque* DE SPECIALISTES!



JEUNES GENS!

Pour répondre aux besoins sans cesse grandissants de la Radio française en cadres spécialisés, nous conseillons vivement aux jeunes gens de s'orienter *délibérément* vers les carrières de la T.S.F.

AVIATION CIVILE ET MILITAIRE, INDUSTRIE, MARINE MARCHANDE ET MARINE NATIONALE, COLONIES, MINISTÈRES ET ADMINISTRATIONS. Ces carrières réaliseront les aspirations de la jeunesse moderne, puisqu'elles joignent à l'attrait du scientifique celui de travaux manuels importants.

PREPAREZ CES CARRIERES en suivant nos cours spécialisés
PAR CORRESPONDANCE conçus d'après les méthodes les plus modernes de l'enseignement américain.

INSCRIPTIONS A TOUTE EPOQUE DE L'ANNEE
TOUS NOS COURS COMPORTENT DES EXERCICES PRAATIQUES A DOMICILE

PLACEMENT
A l'heure actuelle, nous garantissons le placement de tous nos élèves opérateurs radiotélégraphistes diplômés.

L'Ecole délivre des **CERTIFICATS DE FIN D'ETUDES** conformément à la loi du 4 août 1942.

Notices gratuitement sur demande.



ECOLE GENERALE PROFESSIONNELLE RADIOTECHNIQUE

14, RUE DE BRETAGNE & RUE DU MARÉCHAL LYAUTEY—VICHY—(ALLIER)

ADRESSÉS DE REPLI

Pub. R. Domenach M.C.S.P.

MÉTÉORE

Qualité d'abord

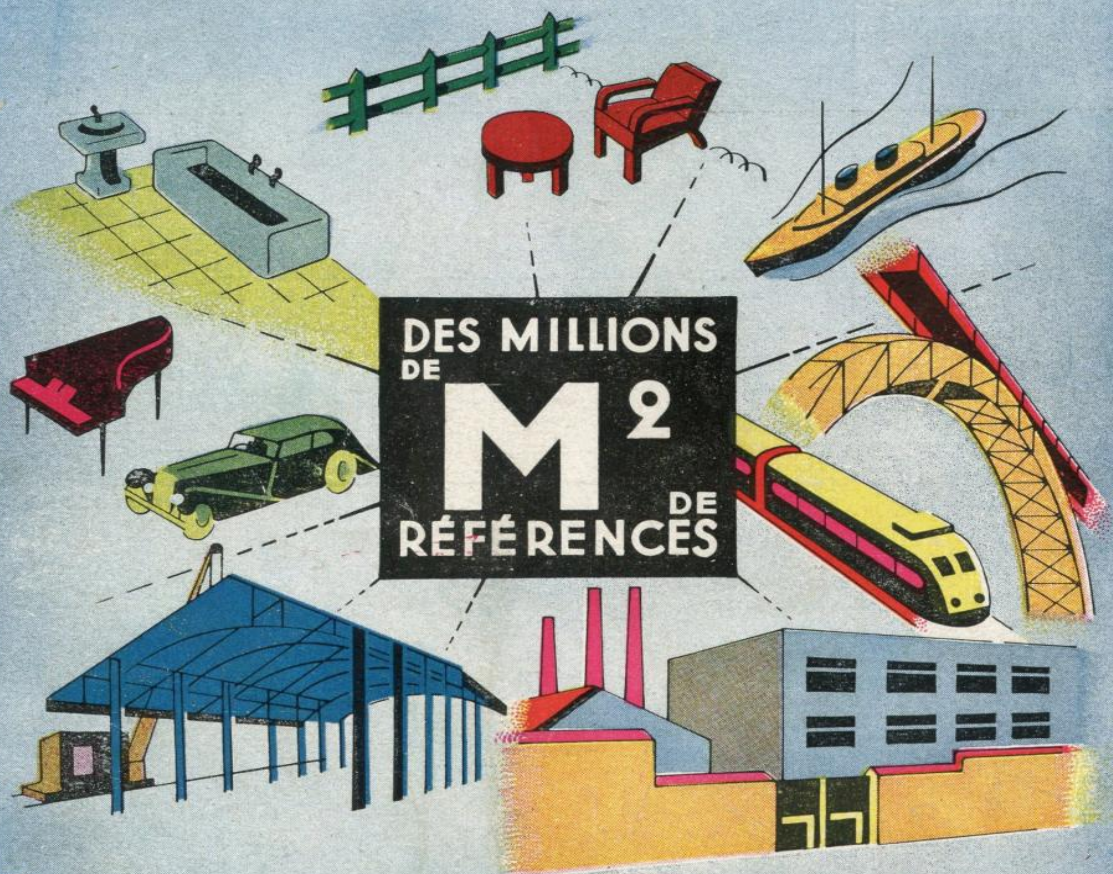
S'impose au monde entier

LA PLUME "VÆDIUM"
Même technique. Même usage.
Même garantie que la plume "OR"

DARBAUD S.A.

NITROLAC

LA GRANDE MARQUE DE PEINTURE



TOUS LES PROBLÈMES DE PEINTURE

NITROLAC

98, ROUTE D'AUBERVILLIERS-ST DENIS (SEINE)-PLAINE+1655

IMPR RÉGIONALE 59 RUE BAYARD TOULOUSE I.C.O 31 2650