

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 - https://cnum.cnam.fr](https://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 possible 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)	Auteur collectif - Revue
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1949-2003
Collation	167 vol.
Nombre de volumes	167
Cote	INDNAT
Sujet(s)	Industrie
Note	Numérisation effectuée grâce au prêt de la collection complète accordé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (S.E.I.N.)
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039224155
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT
LISTE DES VOLUMES	
	1949, n° 1 (janv.-mars)
	1949, n° 2 (avril-juin)
	1949, n° 3 (juil.-sept.)
	1949, n° 4 (oct.-déc.)
	1949, n° 4 bis
	1950, n° 1 (janv.-mars)
	1950, n° 2 (avril-juin)
	1950, n° 3 (juil.-sept.)
	1950, n° 4 bis
	1951, n° 1 (janv.-mars)
	1951, n° 2 (avril-juin)
	1951, n° 3 (juil.-sept.)
	1951, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° 1 (janv.-mars)
	1952, n° 2 (avril-juin)
	1952, n° 3 (juil.-sept.)
	1952, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° spécial
	1953, n° 1 (janv.-mars)
	1953, n° 2 (avril-juin)
	1953, n° 3 (juil.-sept.)
	1953, n° 4 (oct.-déc.)
	1953, n° spécial
	1954, n° 1 (janv.-mars)
	1954, n° 2 (avril-juin)
	1954, n° 3 (juil.-sept.)
	1954, n° 4 (oct.-déc.)
	1955, n° 1 (janv.-mars)

	1955, n° 2 (avril-juin)
	1955, n° 3 (juil.-sept.)
	1955, n° 4 (oct.-déc.)
	1956, n° 1 (janv.-mars)
	1956, n° 2 (avril-juin)
	1956, n° 3 (juil.-sept.)
	1956, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° 2 (avril-juin)
	1957, n° 3 (juil.-sept.)
	1957, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° spécial (1956-1957)
	1958, n° 1 (janv.-mars)
	1958, n° 2 (avril-juin)
	1958 n° 3 (juil.-sept.)
	1958, n° 4 (oct.-déc.)
	1959, n° 1 (janv.-mars)
	1959, n° 2 (avril-juin)
	1959 n° 3 (juil.-sept.)
	1959, n° 4 (oct.-déc.)
	1960, n° 1 (janv.-mars)
	1960, n° 2 (avril-juin)
	1960, n° 3 (juil.-sept.)
	1960, n° 4 (oct.-déc.)
	1961, n° 1 (janv.-mars)
	1961, n° 2 (avril-juin)
	1961, n° 3 (juil.-sept.)
	1961, n° 4 (oct.-déc.)
	1962, n° 1 (janv.-mars)
	1962, n° 2 (avril-juin)
	1962, n° 3 (juil.-sept.)
	1962, n° 4 (oct.-déc.)
	1963, n° 1 (janv.-mars)
	1963, n° 2 (avril-juin)
	1963, n° 3 (juil.-sept.)
	1963, n° 4 (oct.-déc.)
	1964, n° 1 (janv.-mars)
	1964, n° 2 (avril-juin)
	1964, n° 3 (juil.-sept.)
	1964, n° 4 (oct.-déc.)
	1965, n° 1 (janv.-mars)
	1965, n° 2 (avril-juin)
	1965, n° 3 (juil.-sept.)
	1965, n° 4 (oct.-déc.)
	1966, n° 1 (janv.-mars)
	1966, n° 2 (avril-juin)
	1966, n° 3 (juil.-sept.)
	1966, n° 4 (oct.-déc.)
	1967, n° 1 (janv.-mars)
	1967, n° 2 (avril-juin)
	1967, n° 3 (juil.-sept.)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1980, n° 1
	1982, n° spécial

	<u>1983, n° 1</u>
	<u>1983, n° 3-4</u>
	<u>1983, n° 3-4</u>
	<u>1984, n° 1 (1er semestre)</u>
	<u>1984, n° 2</u>
	<u>1985, n° 1</u>
	<u>1985, n° 2</u>
	<u>1986, n° 1</u>
	<u>1986, n° 2</u>
	<u>1987, n° 1</u>
	<u>1987, n° 2</u>
	<u>1988, n° 1</u>
	<u>1988, n° 2</u>
	<u>1989</u>
	<u>1990</u>
	<u>1991</u>
	<u>1992</u>
	<u>1993, n° 1 (1er semestre)</u>
	<u>1993, n° 2 (2eme semestre)</u>
	<u>1994, n° 1 (1er semestre)</u>
	<u>1994, n° 2 (2eme semestre)</u>
	<u>1995, n° 1 (1er semestre)</u>
	<u>1995, n° 2 (2eme semestre)</u>
	<u>1996, n° 1 (1er semestre)</u>
	<u>1997, n° 1 (1er semestre)</u>
	<u>1997, n°2 (2e semestre) + 1998, n°1 (1er semestre)</u>
	<u>1998, n° 4 (4e trimestre)</u>
	<u>1999, n° 2 (2e trimestre)</u>
	<u>1999, n° 3 (3e trimestre)</u>
	<u>1999, n° 4 (4e trimestre)</u>
	<u>2000, n° 1 (1er trimestre)</u>
	<u>2000, n° 2 (2e trimestre)</u>
	<u>2000, n° 3 (3e trimestre)</u>
	<u>2000, n° 4 (4e trimestre)</u>
	<u>2001, n° 1 (1er trimestre)</u>
	<u>2001, n° 2-3 (2e et 3e trimestres)</u>
	<u>2001, n°4 (4e trimestre) et 2002, n°1 (1er trimestre)</u>
	<u>2002, n° 2 (décembre)</u>
	<u>2003 (décembre)</u>

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	<u>1980, n° 1</u>
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1980

Collation	1 vol (42 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	48
Cote	INDNAT (130)
Sujet(s)	Industrie
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	03/09/2025
Date de génération du PDF	08/09/2025
Recherche plein texte	Non disponible
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.130

Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

[L'Industrie nationale](#) prend, de 1947 à 2003, la suite du [Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publié de 1802 à 1943 et que l'on trouve également numérisé sur le CNUM. Cette notice est destinée à donner un éclairage sur sa création et son évolution ; pour la présentation générale de la Société d'encouragement, on se reporterà à la [notice publiée en 2012 : « Pour en savoir plus »](#)

[Une publication indispensable pour une société savante](#)

La Société, aux lendemains du conflit, fait paraître dans un premier temps, en 1948, des [Comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publication trimestrielle de petit format résumant ses activités durant l'année sociale 1947-1948. À partir du premier trimestre 1949, elle lance une publication plus complète sous le titre de [L'Industrie nationale. Mémoires et comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#).

Cette publication est différente de l'ancien [Bulletin](#) par son format, sa disposition et sa périodicité, trimestrielle là où ce dernier était publié en cahiers mensuels (sauf dans ses dernières années). Elle est surtout moins diversifiée, se limitant à des textes de conférences et à des rapports plus ou moins développés sur les remises de récompenses de la Société.

[Une publication qui reflète les ambitions comme les aléas de la Société d'encouragement](#)

À partir de sa création et jusqu'au début des années 1980, [L'Industrie nationale](#) ambitionne d'être une revue de référence abondant, dans une sélection des conférences qu'elle organise — entre 8 et 10 publiées annuellement —, des thèmes extrêmement divers, allant de la mécanique à la biologie et aux questions commerciales, en passant par la chimie, les différents domaines de la physique ou l'agriculture, mettant l'accent sur de grandes avancées ou de grandes réalisations. Elle bénéficie d'ailleurs entre 1954 et 1966 d'une subvention du CNRS qui témoigne de son importance.

À partir du début des années 1980, pour diverses raisons associées, problèmes financiers, perte de son rayonnement, fin des conférences, remise en question du modèle industriel sur lequel se fondait l'activité de la Société, [L'Industrie nationale](#) devient un organe de communication interne, rendant compte des réunions, publient les rapports sur les récompenses ainsi que quelques articles à caractère rétrospectif ou historique.

La publication disparaît logiquement en 2003 pour être remplacée par un site Internet de même nom, complété par la suite par une lettre d'information.

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

Daniel Blouin, Gérard Emtoz, [« 220 ans de la Société d'encouragement »](#), Histoire et Innovation, le carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement, en ligne le 25 octobre 2023.

Gérard EMTOZ, [« Les parcours des présidents de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale des années 1920 à nos jours. Deuxième partie : de la Libération à nos jours »](#), Histoire et Innovation, carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en ligne le 26 octobre 2024.

S. E. I. N.
Bibliothèque

ISSN : 0019-9133

L'INDUSTRIE NATIONALE

*Comptes rendus et Conférences
de la Société d'Encouragement
pour l'Industrie Nationale*

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*

Revue trimestrielle
1980 - N° 1

N° 1 — 1980

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES.

- Production énergétique à partir des déchets et sous-produits agricoles,
par André GAC, p. 3

- Le moteur d'automobile : son évolution - son avenir,
par Paul RAPIN, p. 13

ACTIVITES DE LA SOCIETE.

- Notice nécrologique 1980. *p. 43*

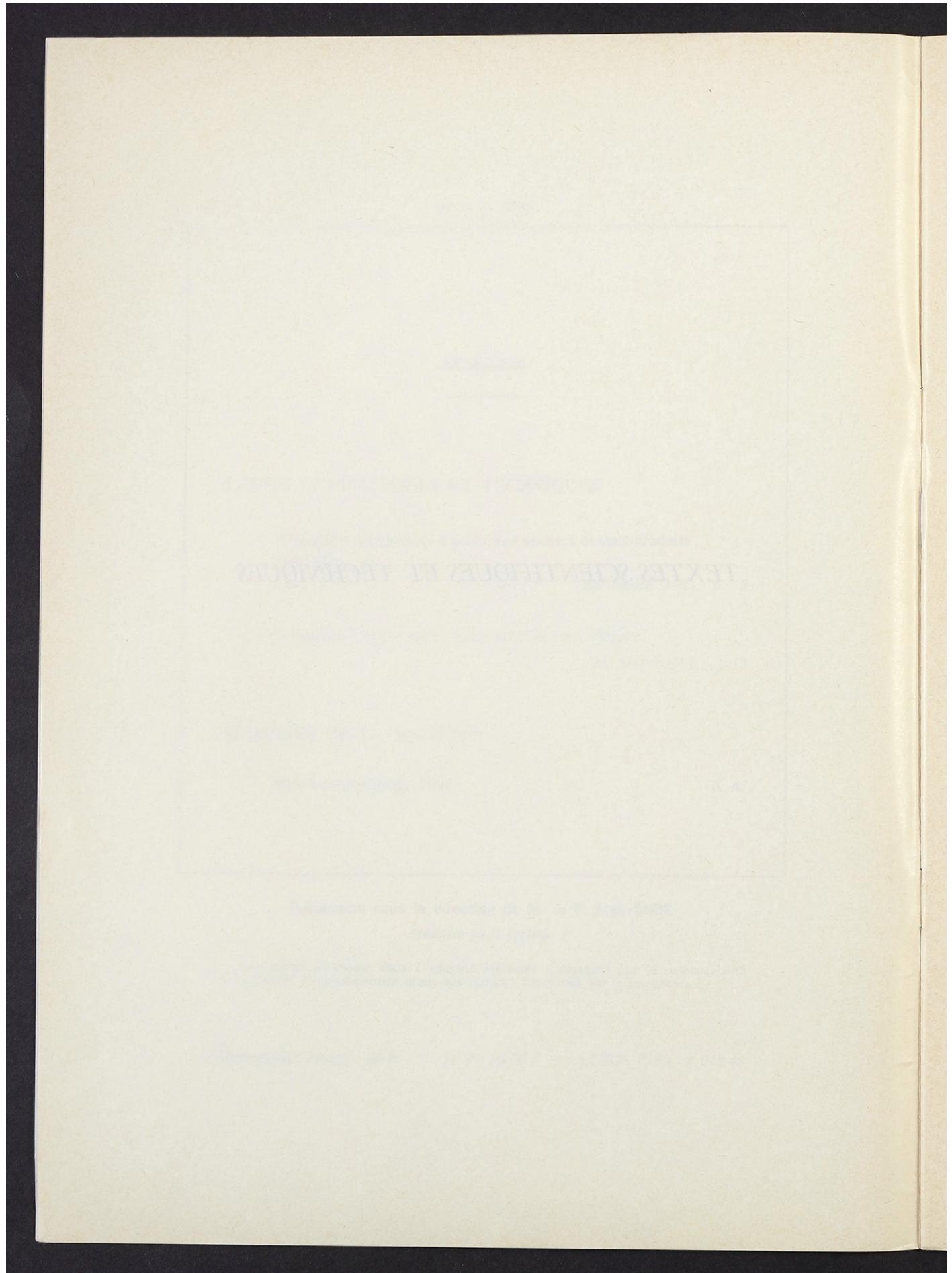
Publication sous la direction de M. le Pr Jean BURÉ

Président de la Société

Les textes paraissant dans *L'Industrie Nationale* n'engagent pas la responsabilité de la Société d'Encouragement quant aux opinions exprimées par leurs auteurs.

Abonnement annuel : 60 F le n° : 25,00 F C.C.P. Paris, n° 618-48

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES



« Production énergétique à partir des déchets et sous-produits agricoles » ()*

par André GAC,

Ingénieur Général du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Produire de l'énergie à partir des déchets et sous-produits agricoles fait partie de l'ensemble des préoccupations actuelles concernant la valorisation de l'énergie solaire.

Il convient, en effet, de rappeler que cette énergie n'est pas seulement l'énergie primaire des procédés physiques des capteurs thermiques, des capteurs photovoltaïques ou des autres systèmes physiques conduisant à l'énergie hydraulique, à l'énergie marée-motrice et à l'énergie éolienne. Elle est aussi l'énergie primaire de la production de biomasse, c'est-à-dire de matières végétales, grâce au mécanisme de la photosynthèse. La production végétale fait partie d'une chaîne de traitements et de transformations dont le terme final est, selon le but recherché, un aliment, une matière première industrielle, un combustible, un facteur de dépollution et de qualité de vie.

L'exploitation intensive de l'énergie solaire suppose que soient prises, dès le départ, un certain nombre d'options, concernant en particulier :

— l'occupation du territoire : la collecte de l'énergie, sur une même surface, est la plus importante avec les procédés physiques de captation thermique ou photovoltaïque, mais l'énergie obtenue est fugace et doit être utilisée immédiatement ou dans un délai très court.

La transformation de la lumière solaire par l'assimilation chlorophyllienne se fait avec un rendement moyen annuel médiocre (0,4 à 2 %) ; la production d'énergie, sous forme de biomasse, est donc plus faible mais elle se présente dans la majorité des cas sous forme stockée de sorte qu'il n'y a aucune obligation soit de transformer immédiatement la biomasse, soit d'utiliser sans délai le combustible obtenu à partir de cette dernière :

— la destination de la biomasse : la biomasse récoltée sur une surface donnée de sol ne devrait être employée à des fins industrielles ou énergétiques que si sont satisfaits de façon prioritaire les besoins alimentaires et si sont respectées les exigences écologiques. La biomasse pour l'énergie ne peut donc être qu'un surplus. Elle peut être constituée soit par les déchets et sous-produits des activités agricoles et forestières, soit par des cultures faites à des fins énergétiques sur un excédent de terres cultivables. Ces terres peuvent être récupérées et remises en exploitation ou bien être libérées, grâce à l'accroissement de la productivité. Enfin la biomasse peut être fournie sur un domaine non encore véritablement exploité ; dans ce dernier cas, il s'agit du domaine aquatique, des étangs et lacs et des zones maritimes littorales.

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 29 novembre 1979.

PRODUCTION ENERGETIQUE A PARTIR DES DECHETS

Enfin, l'obtention d'une certaine surface de terre cultivable peut aussi résulter d'une réduction, même légère, de la consommation en aliments animaux au profit des aliments végétaux.

**

Dès le début de la crise pétrolière, en 1973-1974, on a pensé à utiliser les rebuts agricoles et forestiers, et notamment les matières végétales dont la transformation en énergie avait été progressivement abandonnée, en raison de l'abondance et du faible prix des combustibles fossiles. Il s'agit des bois laissés sur place lors de l'exploitation forestière (houpiers, bois de taillis...), des sous-produits des industries du sciage (sciure, copeaux, écorces, déchets divers), des pailles de céréales brûlées après récolte, des sous-produits de l'élevage (fumier et lisier) ainsi que ceux de certaines industries agro-alimentaires.

Dans le même temps, on a étudié les procédés permettant d'obtenir un combustible ; il ne s'agissait pas d'innovations mais de perfectionner des procédés connus et qui avaient été largement utilisés dans le passé.

Ces études ont été entreprises à partir de 1974 dans le cadre d'un Comité de la Délégation générale à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.). Ce Comité, Comité de valorisation des déchets agricoles (V.E.D.A.), a suscité en 3 années de fonctionnement plus de 50 actions de recherche et d'étude et accordé au total 6 millions d'aides. En fait, les études faites représentent une valeur à peu près 4 à 5 fois supérieure. Elles ont porté sur les trois principaux thèmes suivants :

- l'estimation de la ressource ;
- la fermentation méthanoïgène ;
- la combustion et gazéification.

Dans cet exposé, nous présenterons ces 3 thèmes ainsi que celui de la fermentation alcoolique.

Pour terminer, nous évoquerons les perspectives, pour un proche avenir, d'une nouvelle agriculture à des fins énergétiques.

1. — *La ressource.*

Dans l'état actuel de nos connaissances, on est maintenant capable de préciser quelle est l'importance de la ressource bien que selon les auteurs on puisse noter des différences assez importantes. Ainsi, dans le cas de la forêt, il convient, d'une part de prendre en compte les bois qui sont utilisés pour le chauffage des habitations, essentiellement en milieu rural et dont les volumes sont mal connus, ainsi que pour certaines applications industrielles et, d'autre part, de limiter l'estimation du potentiel énergétique de la forêt à une quantité n'excédant pas la production annuelle des arbres. Il faut, en effet, s'efforcer d'améliorer le capital forestier et de poursuivre en priorité la production de bois d'œuvre et de bois industriels de bonne qualité ; ceci implique que l'extraction des bois de chauffage soit faite avec modération et clairvoyance.

Un facteur à ne pas négliger est le coût de la mise en valeur de certains déchets. Lorsque ceux-ci sont dispersés dans l'espace rural, leur collecte et leur transport vers les lieux d'utilisation peuvent grever de façon excessive le prix de revient de l'opération. C'est pourquoi les sous-produits agricoles et forestiers les plus intéressants sont ceux qui sont nécessairement regroupés compte tenu des activités normales, soit de l'agriculture, soit des industries agricoles et alimentaires. Ceci est le cas pour les sous-produits des scieries ou de certaines industries comme celle du lin, ou bien pour les pare-feu dont il faut éliminer les bois coupés pour qu'ils soient pleinement efficaces ou encore des fumiers et lisiers spécialement dans les élevages importants.

Pratiquement, on estime aujourd'hui que la ressource agricole et forestière immédiatement et effectivement mobilisable est la suivante :

paille	1 à 2 MtEP
exploitation des forêts ..	1 à 2 MtEP
industries du bois	1 à 2 MtEP
sous-produits d'élevage .. (fumier et lisier)	0,5 à 1 MtEP

6 MtEP

Si l'on tient compte des déchets déjà utilisés qui sont estimés de l'ordre de 2 à 3 MtEP, la contribution de l'agriculture est au total de 8 à 9 MtEP. Ce chiffre est à rapprocher des besoins directs de l'agriculture et des industries agro-alimentaires qui sont respectivement de 4 et 4,5 MtEP. L'agriculture serait donc en mesure de couvrir à peu près la totalité de ses consommations directes en énergie, non pas exclusivement par l'auto-utilisation de ses sous-produits, mais en fournissant à la communauté nationale l'équivalent de ce que celle-ci lui octroie pour le fonctionnement de ses tracteurs et d'une façon générale de ses équipements mobiles.

Les estimations indiquées ci-dessus sont encore modestes. Elles représentent environ 5 % de la consommation énergétique totale du pays. Les perspectives qu'elles représentent sont cependant suffisamment prometteuses pour que le gouvernement ait indiqué de façon très nette sa volonté de valoriser la biomasse, en mettant en place un Comité biomasse-énergie au C.O.M.E.S., qui a pris la succession du Comité V.E.D.A., en créant une mission énergie auprès du ministre de l'agriculture dont notre Président de séance, M. F. Blai-zot est le responsable et, enfin, en augmentant de façon substantielle les crédits de recherche et de développement en faveur de l'énergie agricole.

Enfin, compte tenu du potentiel énergétique de certains déchets, on pourrait chercher à en accroître la quantité. Par exemple, on pourrait, par la sélection génétique, créer des variétés de céréales à longues tiges, mais ces variétés seraient sans doute plus fragiles que les variétés actuelles, notamment aux maladies et à la verse. Une telle démarche serait généralement assez peu efficace. Un déchet peut devenir un sous-produit récupérable, mais sa rentabilité restera petite devant celle de la spéculation principale même si elle contribue à accroître l'intérêt global de celle-ci, d'autant que le rendement de la plupart des cultures croîtra encore dans les prochaines années. Par contre, des perspectives, plus séduisantes à moyen et long termes, concernent « l'agriculture énergétique », c'est-à-dire les systèmes et

techniques culturelles fournissant des quantités importantes de matière végétale (biomasse), en un temps court et en exportant aussi peu que possible d'éléments minéraux et d'azote. Nous évoquerons ces perspectives nouvelles à la fin de cet exposé.

2. — *La fermentation méthanogène.*

La fermentation méthanogène des déchets organiques humides, agricoles ou industriels, des fumiers et des lisiers, est, *a priori*, un procédé séduisant parce qu'il fournit un combustible ainsi qu'un amendement agricole et parce qu'il contribue à éliminer les nuisances dues aux élevages spécialement les plus importants.

Ce procédé avait connu en Europe un certain essor pendant la dernière guerre mondiale, mais il avait été abandonné avec l'arrivée des produits pétroliers abondants et peu coûteux. Il est dommage que les études et les efforts de l'industrie aient ainsi été arrêtés. Cependant, la fermentation méthanogène a été souvent adoptée par le monde agricole de certains pays : actuellement, de nombreux équipements, très rustiques et peu performants il est vrai, sont en service en Extrême-Orient : 7 millions en Chine (soit 15 fois plus en 1978 qu'en 1975), aux Indes, en Corée, à Formose, aux Philippines, ...

Parallèlement, depuis près d'un siècle, des fermenteurs industriels ont été progressivement mis au point pour assurer en continu l'élimination des boues résiduaires des stations d'épuration ; l'objectif initial était la dépollution, mais, surtout depuis la crise de l'énergie de 1973, le méthane obtenu contribue à fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement des stations. Ainsi la station d'Achères, près de Paris, dispose d'une centrale autonome alimentée par le méthane fourni par les digesteurs de boues et couvre entre 50 et 75 % de ses besoins en électricité.

Il existe deux types de digesteurs, selon qu'ils fonctionnent en continu ou en discontinu.

A priori les appareils en continu sont les plus intéressants parce qu'ils peuvent (ou

devraient) être rendus facilement automatiques et parce que, en particulier, le chargement et le déchargement effectués par pompage, ne devraient pas engendrer de servitudes excessives.

En fait, si le substrat est un lisier riche en eau, c'est-à-dire si sa teneur en matière sèche n'excède pas 10 ou 15 %, le milieu peut facilement circuler dans le digesteur et la fermentation être conduite en continu. Par contre, s'il s'agit de fumier paileux, dont la teneur en matière sèche est au moins de 25 %, on n'est pas encore parvenu à réaliser des matériels aptes à déplacer la matière dans de bonnes conditions techniques et économiques à moins de la broyer assez finement et en outre de la diluer éventuellement. C'est pourquoi des digesteurs performants fonctionnant en discontinu ont des chances d'intéresser les éleveurs spécialement de bovins.

— *Fermentation en continu.*

Bien qu'il soit perfectible, le procédé en continu est aujourd'hui opérationnel ; il peut être appliqué au traitement des lisiers ainsi que des eaux résiduaires diluées des industries agricoles et alimentaires et des stations d'épuration des agglomérations rurales. L'industrie fabrique normalement des cuves d'un volume minimal de 50 m³. Cette cuverie correspond au traitement du lisier d'un élevage de 1 000 porcs (5 litres par jour de lisier et séjour de 10 jours en fermenteur) ; or, du point de vue économique, la production de méthane sur une exploitation d'élevage porcin ne paraît être économiquement envisageable que si le cheptel est au minimum de 800 porcs. Dès à présent, par un effort de démonstration et de vulgarisation, l'installation de fermenteurs en continu des lisiers serait réalisable.

— *Fermentation en discontinu.*

La situation est sensiblement moins favorable en ce qui concerne la fermentation en discontinu. La conduite de la fermentation est certes assez bien définie, notamment à la suite des travaux récents conduits dans le cadre du Comité V.E.D.A. Mais il faudrait que l'industrie conçoive et fabrique en série des digesteurs effi-

caces et fiables. En particulier, ceux-ci doivent être étanches, très bien isolés thermiquement, aptes à être chauffés économiquement et, enfin, être faciles à charger et à décharger au moyen d'une fourche mécanique. C'est sans doute par l'élimination des servitudes de la manutention manuelle des fumiers que la fermentation en discontinu sera adoptée par les éleveurs.

Les conditions de la conduite de la fermentation peuvent être ainsi résumées :

— la production en méthane est directement fonction de la quantité de matière organique (M.O.) introduite dans le digesteur ; ceci justifie que le fumier soit compacté lors du chargement de façon à extraire le maximum de gaz par unité de volume de cuverie. La production est en moyenne de 0,2 m³ de méthane pur/kg M.O. ; la densité de chargement, selon le tassement du fumier, est comprise entre 50 et 150 kg M.O./m³ de fermenteur ; enfin la teneur en méthane du gaz brut est de l'ordre de 50 à 60 % ;

— la fermentation, qui commence, de façon négligeable à 20 °C, est active entre 35 et 60 °C, avec un maximum vers 45 °C. Si accidentellement, la température d'une cuve est abaissée au-dessous de 35 °C, la fermentation est ralentie mais elle ne redémarre pas aussitôt que le milieu est réchauffé à 35 °C ; il y a un temps de réponse de l'ordre d'une semaine. De ce fait, il est très important d'assurer en permanence le maintien des cuves à au moins 35 °C ;

— l'agitation par recirculation de la phase liquide paraît être inutile ;

— la durée pratique du cycle est de 6 semaines après le début de la fermentation. En fait, à 35 °C, le cycle total de méthanisation est de 15 semaines ; mais en moyenne les 3/4 de la production totale sont obtenus en 6 semaines et 92 % en 10 semaines ;

— le démarrage de la fermentation a longtemps été un problème car la fermentation commence spontanément après un retard qui peut être de plusieurs semaines. On sait aujourd'hui que cette temporisa-

tion peut être annulée soit en démarrant l'opération par une phase de fermentation aérobie (procédé Isman), qui élève la température de la masse, mais qui diminue la quantité de carbone transformable en méthane, soit en immergeant le substrat avec un mélange eau-pied de cuve (1 à 1 en volume) ; le pied de cuve provient d'une cuve ayant achevé sa fermentation (procédé Zelter, I.N.R.A.) ;

— la production journalière moyenne de méthane pur par cycle de 6 semaines est comprise entre 0,5 et 0,7 m³/jour et m³ de cuve, pour des densités de chargement respectivement de moins de 100 et jusqu'à 160 kg (M.O.)/m³ de cuve.

D'autre part, la production de fumier est de 40 à 45 kg/jour et par bovin, ce qui, pour une teneur en M.S. de 8 kg à 80 ou 85 % de M.O., correspond à une production d'environ 6 kg M.O./jour et bovin.

— De ce qui précède, on peut indiquer les équivalences suivantes :

- 1 bovin produit 2 m³/jour de gaz brut, c'est-à-dire 1 à 1,2 m³ de CH₄, ce qui correspond à environ 11 000 kcal/jour (ou un kgE.P.) ;
- 1 m³ de cuverie peut loger au minimum le fumier journalier de 10 bovins. En tassant plus ou moins fortement, ce chargement pourrait être augmenté jusqu'à 50 % ;
- la production de gaz d'un bovin est équivalente à celle produite par 15 moutons, ou 20 porcs (sous forme de fumier pailleux) ou 100 humains.

La rentabilité n'est pas assurée si les unités de fermentation sont trop petites. Bien que l'on ne dispose pas actuellement de référence permettant de fixer avec précision le seuil de rentabilité des installations méthanogènes, on estime, dans la conjoncture présente, que ce seuil devrait correspondre à la couverture des besoins de chauffage et à la fourniture de l'eau chaude sanitaire pour une famille rurale, soit 400 000 kcal/jour ou 80 m³/jour de gaz brut. Une telle production suppose un cheptel minimal de l'ordre de 40 bovins ou 800 porcins, ou 600 ovins. Le volume total de cuverie devrait être d'environ 150 m³ pour ces élevages.

En France, sur les quelques 810 000 élevages bovins, 140 000 environ comptent 40 bovins et plus et regroupent 14,5 millions d'animaux, c'est-à-dire plus de 60 % du cheptel. Bien que dans bon nombre d'exploitations les animaux soient en stabulation libre ou en herbage, le marché potentiel en digesteurs discontinus est considérable pour l'industrie.

Pour les porcins, la situation est apparemment moins favorable car 4 600 élevages ont de 400 à 1 000 porcs et 500 plus de 1 000 porcs sur un total de 439 500 exploitations et près de 11 millions d'animaux. Cependant, comme les animaux sont en permanence en bâtiment d'élevage, le débouché pour les constructeurs de fermentateurs de lisiers est également important.

Le gaz obtenu peut servir au chauffage mais aussi au fonctionnement de moteurs. Pour ce dernier cas, le gaz pourrait être fortement comprimé et les bouteilles pourraient être chargées sur des engins mobiles, tels que des voitures ou des tracteurs. Cependant, pour des raisons évidentes de sécurité, il ne faut pas envisager la compression du gaz dans les fermes.

S'il y a excès de méthane, notamment en été, il pourrait être utilisé à certaines activités agricoles (séchage de fourrages et de foin ...). Il pourrait aussi alimenter un groupe électrogène pour les besoins internes de l'exploitation. En principe, ce groupe pourrait également débiter sur le réseau d'E.D.F., mais certaines conditions techniques impératives doivent être satisfaites : fourniture d'électricité en moyenne tension ; installation d'un double compage et de dispositifs de protection. Le coût global de ces équipements est de l'ordre de 25 000 francs. Ces contraintes rendent peu attractives, au niveau de la ferme, la production d'électricité à partir du méthane, pour le moment du moins.

Enfin, on pourrait envisager de construire au niveau d'un village une micro-centrale électrique. Pour une puissance de 100 kVA, ce qui paraît être un minimum, elle consommerait 1 500 m³ de gaz brut par jour, ce qui supposerait un cheptel de l'ordre de 8 à 900 bovins ou de

15 000 porcs et un volume de cuverie de 2 000 à 2 500 m³. Ces chiffres montrent que la transformation du méthane biologique en électricité est peu séduisante. Le méthane paraît être avant tout un combustible générateur de chaleur.

3. — *La combustion et la gazéification.*

Jusqu'à la fin de la dernière guerre mondiale, les utilisations des végétaux secs à des fins énergétiques ne concernaient que les bois et étaient les suivantes :

- la combustion totale,
- la carbonisation avec la production de charbon de bois et de gaz riches,
- la gazéification et la production d'un carburant gazeux, utilisable notamment pour le fonctionnement de moteurs.

Comme cela a été le cas pour le méthane, ces filières ont été progressivement abandonnées au profit des carburants fossiles. Depuis la crise, ces techniques ont fait l'objet de nouvelles recherches étendues à tous les produits ligneux et cellulosaques.

Pour la clarté de l'exposé, il est bon de rappeler sommairement les conditions caractérisant les phénomènes de carbonisation et de gazéification :

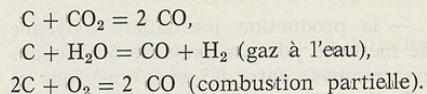
Quand on chauffe du bois à l'abri de l'air, il se dégage des substances condensables, les pyrolygneux (acétone, goudrons ...) et des gaz (CO₂, CO, H₂), tandis que le bois se transforme en charbon de bois. Les proportions sont les suivantes :

— bois initial	100 %
— pyrolygneux	49 %
dont :	

● eau	28 à 29 %
● acide acétique	3,9 %
● acétone, acide formique ..	1,4 %
● méthanol	2,5 %
● goudrons et huiles lourdes	10,5 %
— gaz	17 à 18 %
dont :	
● CO	5 %

● CO ₂	11 %
● carbures	1,1 %
● H ₂ , O ₂ divers	traces
— charbon de bois	33 à 34 %

Si on monte à la température de 900 °C environ, le charbon se gazéifie en présence d'eau, selon les réactions élémentaires suivantes :



Le mélange gazeux obtenu est composé de 15 % de CO, 15 à 20 % de H₂, 15 % de CO₂, 50 % de N₂ et de petites quantités de CH₄, carbures...

Les pyrolygneux peuvent être brûlés et les gaz sont réintroduits dans le four (procédé de Lacotte) ; ils peuvent être craqués dans le four principal (procédé Duvant).

D'autre part, en ce qui concerne la carbonisation, une recherche récente de M. Péetroff a défini les aptitudes des diverses essences, nationales ou tropicales, à la production de charbon de bois, de pyrolygneux et de gaz. Il est apparu que, dans l'ensemble, il n'y a pas de différences notables d'aptitudes entre les diverses espèces forestières ; cependant les rendements les plus élevés en charbon sont fournis par les bois riches en lignine (37 % du bois sec) et ceux en pyrolygneux par les essences riches en cellulose et hémicelluloses (51 % du bois sec) ; en particulier, sous réserve de confirmation, le méthanol pourrait provenir de la cellulose et pas seulement de la lignine. Enfin, le rendement en gaz dépend assez peu de la composition chimique des matières premières.

Les recherches faites depuis ces cinq dernières années ont porté, d'une part, sur l'amélioration du fonctionnement de foyers, et d'autre part, sur la conception de nouveaux gazogènes.

En ce qui concerne la combustion, les foyers réalisés permettent de brûler des rondins, des copeaux de bois, de la sciure ainsi que de la paille comprimée. La conception de ces équipements n'est pas nou-

veille, elle dérive directement de celle des foyers à combustibles solides (charbon). Les progrès cependant portent d'une part sur un procédé d'agglomération à haute pression et peu coûteux de la paille, qui est en phase de développement au C.N.E.E.M.A. et, d'autre part, sur l'automatisation de l'alimentation des foyers. Il était en effet tout à fait admissible, il y a encore une vingtaine d'années de charger une chaudière manuellement une ou deux fois par jour. Aujourd'hui ce n'est guère admissible ; pour que la biomasse sèche puisse concurrencer les combustibles fossiles, il est indispensable que la commodité d'emploi des chaudières à bois ou à paille soit comparable à celle des chaudières à fuel. C'est pourquoi on envisage, dans un très proche avenir, de produire des chaudières connectées sur un système d'alimentation automatique et de préparer le combustible sous des formes économiques et faciles d'emploi (foyer « en suspension » de Pillard).

En ce qui a trait à la gazéification, les gazogènes ont été très largement utilisés pour les transports pendant la dernière guerre mondiale, grâce notamment aux études qui avaient été conduites par l'industrie et les forestiers. Ces équipements ont été également largement installés dans les pays en voie de développement, beaucoup moins pour les engins mobiles que pour l'entraînement de petits groupes électrogènes. Depuis 1975 des prototypes de conception originale ont été construits et sont parvenus à la phase du développement industriel.

Leurs principaux avantages sont :

— selon les matériaux, utilisation de déchets végétaux ligneux et cellulosaques de toutes granulométries, depuis les particules fines comme de petits morceaux de paille à la bûche ou aux cubes de paille comprimée à forte densité ;

— élimination des cendres à l'état pulvérulent (et non de mâchefer), pouvant être facilement redistribuées sur des sols de culture ou des sols forestiers, ce qui est important pour préserver la fertilité ;

— rendement global pour un ensemble constitué d'un gazogène, d'un moteur Dual

et d'un groupe électrogène de 1kg de bois par kWh ; en d'autres termes, le rendement total est de l'ordre de 25 %, ce qui est tout à fait satisfaisant si on tient compte du rendement nécessairement limité du moteur.

Ces nouveaux gazogènes sont les suivants :

— gazogène à lit fixe pour des produits de moyenne granulométrie ; ce gazogène développé par le C.N.E.E.M.A. est particulièrement compact ;

— un gazogène en suspension pour les particules fines ; il est constitué d'une sorte de trémie à axe horizontal. L'atmosphère, mise en mouvement par un ventilateur, est pulsée à travers les produits qui sont ainsi fluidisés. Grâce à une addition convenablement réglée d'air extérieur, la température du lit est élevée jusqu'à celle de gazéification ; le gaz combustible est extrait par la partie axiale alors que les produits sont introduits en continu par l'intermédiaire d'un sas rotatif situé au début de la zone de pyrolyse ;

— un gazogène à lit fixe à tirage inversé pour les morceaux de bois et les bûches. Il est de conception voisine du système de De Lacotte mais il est moins encombrant et, de ce fait, devrait être moins coûteux. En outre les cendres ne se prendraient pas en mâchefer et il ne se formerait pas de voûte dans le bois, au cours de sa descente progressive vers la zone de gazéification.

Ces différents matériaux sont bien entendu capables de gazifier également du charbon de bois.

Enfin, il n'est pas inutile de mentionner ici l'intérêt de la carbonisation. La France consomme en effet 90 000 tonnes par an de charbon de bois, à la fois pour satisfaire des besoins industriels (dont le charbon actif) et pour l'alimentation des foyers domestiques. Pour réduire les coûts de transport de certains bois de feu (houpiers, bois de taillis), on pourrait organiser des chantiers de carbonisation avec fours mobiles métalliques qui sont connus depuis plus de 70 ans et qui sont de conduite beaucoup plus aisée que les meules traditionnelles. L'intérêt de la carbo-

nisation est que la masse extraite est le tiers de la masse initiale et son pouvoir calorifique est à peu près le double de celui du bois de feu.

Les études sur la carbonisation et la gazéification des produits ligno-cellulosiques sont riches en promesses. En effet, en dehors des équipements qui pourraient être réalisés et commercialisés dans un proche avenir, l'étude approfondie des pyrolyseux et des recherches portant sur le traitement du bois et des gaz déboucheraient sur de nouveaux processus chimiques fournissant à l'industrie des polymères dont elle a besoin.

Par exemple, on sait que si on utilise de l'oxygène pur pour la gazéification du bois et si on élimine le CO₂ par lavage, on obtient un gaz dit de « synthèse » composé de CO et de H₂. Ce gaz conduit facilement à l'alcool méthylique, au méthane, ou avec l'azote à de l'ammoniac, de l'urée, etc...

D'autre part, des procédés nouveaux qu'on commence à étudier sérieusement permettent d'obtenir des carburants liquides ou des combustibles qui seraient substituables aux produits pétroliers actuels. Par exemple, par un traitement sous 300 bars et vers 3 ou 400 °C, en présence de solvants, de catalyseurs appropriés, de CO et de H₂, le bois est liquéfié et se transforme en une espèce de « fuel végétal ». Cette technique de « liquéfaction des bois » est l'une des pistes nouvelles qui paraît être spécialement prometteuse.

4. — *La fermentation éthylique.*

Les journaux parlent souvent des efforts développés par le Brésil pour produire de l'éthanol à partir de la canne à sucre.

Effectivement, la fermentation de jus sucrés conduit à de l'alcool éthylique qui peut être notamment employé comme carburant, à la place de l'essence, au prix d'une modification légère du moteur.

En France, depuis peu, les betteraviers proposent d'organiser l'exploitation des usines de façon à extraire du sucre et à distiller de l'alcool avec un minimum de consommation d'énergie.

En fait, pour les plantes sucrières, autres que la canne à sucre et le manioc, le bilan global est, sinon défavorable, du moins très peu positif : la consommation énergétique nécessaire à la culture, à l'extraction et à la distillation est du même ordre de grandeur ou peut-être supérieur à l'énergie récupérée sous forme d'alcool. Par contre, si on recherche des procédés plus économies pour remplacer certains traitements forts consommateurs en énergie primaire (par exemple pompe à chaleur à la place de chaufferie traditionnelle) ou si on adopte des ressources nouvelles comme l'alimentation des chaudières avec des pailles récoltées localement, le bilan énergétique en fuel d'importation peut devenir positif, comme cela est le cas pour la bagasse lorsqu'il s'agit de canne à sucre : la bagasse permet en effet de couvrir les besoins en chaleur de l'usine et, en outre, comme elle est en excès, peut servir de combustible dans d'autres filières d'utilisation.

Pour la France, le développement des cultures de cannes à sucre dans les D.O.M.-T.O.M., ainsi que celle du manioc, spécialement en Guyane, peuvent constituer, pour l'avenir, une ressource intéressante en éthanol.

Aujourd'hui, en fait, le problème majeur tant pour les cultures sucrières métropolitaines que tropicales est d'ordre économique ; les produits pétroliers sont encore nettement moins coûteux ; mais la différence de prix diminue rapidement, d'autant plus que les progrès techniques prévisibles dans l'extraction de l'alcool peuvent contribuer à cette évolution.

A noter, enfin, que l'alcool végétal pourrait avantageusement être substitué à l'éthanol de synthèse utilisé comme matière première industrielle car les prix de revient, dans ce cas, sont à l'avantage du premier cité.

5. — *L'agriculture énergétique.*

A côté de la récupération et de la valorisation des déchets et sous-produits agricoles et forestiers, on peut très valablement envisager une activité agricole à des fins purement énergétiques. Plusieurs scé-

narios sont envisageables et seront prochainement vérifiés expérimentalement.

On a déjà indiqué la possibilité de récolter de la canne de Provence en vue de la brûler dans des chaudières ou des gazogènes, la chaleur obtenue servant à sécher de la luzerne. Ceci suppose que la même exploitation exploite des cannaies et des luzernières de façon à réduire les charges et dépenses intermédiaires. Un très important projet est en cours de réalisation en Craux et devrait être opérationnel dès le mois d'avril prochain. En fait, la culture de la canne n'est pas une nouveauté : la canne, qui est destinée à remplacer le riz, aurait pu servir en papeterie. Un programme expérimental avait été financé il y a une dizaine d'années par la D.G.R.S.T. Les résultats obtenus ont été satisfaisants sur le plan agricole. Mais, pour diverses raisons de technologie papetière et sans doute aussi d'ordre économique, la production de canne pour le papier n'a pas abouti.

Aujourd'hui, on dispose donc d'un certain acquis concernant la génétique et la culture de ce végétal. C'est l'une des raisons pour lesquelles une véritable usine à sécher la luzerne a pu être mise en place rapidement : les autres raisons favorables sont la fabrication par l'industrie de brûleurs et de gazogènes performants pour particules de faible granulométrie et aussi le développement d'un machinisme adapté à ce type particulier de culture.

**

Pour le moyen terme, on peut espérer exploiter des taillis à courte révolution pour des fins purement énergétiques.

En particulier, dans le cas de peupliers, la récolte tous les 5 ans d'environ 15 tonnes de M.S./hectare permet d'alimenter, à partir d'une forêt de 300 hectares, une petite centrale électrique de 100 kW continu par la filière gazogène — moteur — alternateur.

Cependant, comme actuellement on ne dispose que de peu d'informations sur ce type de culture et sur la préservation de la fertilité des sols, il faudrait spéciale-

ment mettre en place une production expérimentale en vraie grandeur, conduite sur 3 révolutions au minimum, de façon concertée avec les divers organismes concernés par la recherche et la production forestières.

Si les résultats de ces recherches étaient positifs on pourrait également envisager de transformer le gaz de gazogène en méthanol ; 15 tonnes tous les 5 ans de bois permettraient d'obtenir 10 tonnes d'alcool ou 4 tEP. Le gain énergétique sous forme d'un carburant ressort à près de 1 tEP/ha et an, ce qui constituerait un débouché qui pourrait être économiquement intéressant pour l'exploitation forestière.

Enfin, la jacinthe d'eau pourrait être également cultivée sur des étangs ou des lacs en vue de sa fermentation ultérieure. La jacinthe d'eau exige une température optimale de croissance de 25 à 30 °C. Cette température pourrait être obtenue par des rejets thermiques industriels et notamment des centrales nucléaires. La production est estimée à, au maximum, 100 tonnes de M.S. par ha et par an, ce qui est équivalent à 20 tEP par ha et par an. La récolte, sur une surface de 22 hectares d'étangs, permettrait, par l'intermédiaire de digesteurs fonctionnant en continu, d'obtenir 30 Nm³ par heure de façon permanente ou, mieux encore, 100 kW électrique, en utilisant le méthane à l'entraînement d'un alternateur. Dans ce cas, en effet, la chaleur rejetée dans les gaz d'échappement et au radiateur du moteur pourrait être utilisée à maintenir les digesteurs en température optimale de fermentation, de 35 °C au moins.

Il apparaît dans cet exemple qu'une surface, petite et aujourd'hui de faible rentabilité (22 ha d'étangs) pourrait contribuer soit à fournir de l'énergie noble, soit à constituer un réseau rural de distribution de gaz.

CONCLUSION

Les perspectives de valorisation de la biomasse, considérées à très long terme,

sont particulièrement séduisantes. Des efforts dès maintenant entrepris par la recherche fondamentale et portant notamment sur les biotopes et sur les phénomènes enzymatiques permettent de penser que l'on pourrait obtenir de l'hydrogène par voie biologique. Parmi les pistes proposées on peut citer celle de la photolyse de l'eau par l'hydrogénase de certaines algues ou encore l'arrêt de la fermentation

tion méthanogène aux précurseurs du méthane dont l'hydrogène est l'un des constituants. L'hydrogène ainsi obtenu pourrait être fixé et stocké sous forme d'hydrure.

Ces perspectives, qui font encore un peu figure de science-fiction, sont telles que certains estiment qu'en 2050, l'agriculture, la sylviculture et l'aquaculture couvriront tous nos besoins énergétiques !

« Le moteur d'automobile : son évolution - son avenir »

par M. Paul RAPIN,
Lauréat de l'Institut

INTRODUCTION

Les premiers records de vitesse ont été établis par des véhicules électriques ;
63,2 km/h, en 1898, par Chateloup-Lau-
bat sur Jeantaud ;
105,9 km/h, en 1899, par Jenatzky sur
Jenatzky ;

ou par des voitures à vapeur :

100,5 km/h, en 1901, par Serpollet sur
Serpollet-Gardner ;
120,8 km/h, en 1902, par le même pilote
sur la même voiture.

C'est à partir de 1904 qu'avec Barras sur
Darracq (168,2 km/h) le moteur à cycle
Beau de Rochas règne sans conteste tant
dans les compétitions que dans l'industrie.
Auparavant, l'année 1886 avait vu naître la
première voiture (3 roues) à allumage
électrique.

Il faudra attendre 1924 pour voir le pre-
mier diesel propulser une automobile.
Mais dix ans auparavant tous les sous-
marins, sauf ceux de la marine améri-
caine, étaient déjà propulsés par des mo-
teurs diesel.

La guerre de 1914-1918 confirme dans
l'automobile la suprématie du moteur à
essence à allumage commandé (Verdun, la
Voie Sacrée).

La période qui sépare les deux guerres
mondiales est caractérisée par un effort
considérable de recherches et d'études. Le
carburateur donne au moteur souplesse et
économie, démarrage aisément et même auto-
matique (starter automatique), l'allumage
par batterie (delco) supplante la magnéto,
la lubrification fait des progrès considé-
rables. Tous les types de construction sont
essayés : 12 cylindres en ligne ou en Vé,
6 cylindres en ligne ou en Vé, etc...

Cependant, en Europe, à la veille des
hostilités de 1939, c'est le 4 cylindres en
ligne qui est devenu le type standard de
la voiture de grande diffusion. Le cycle à
4 temps est à peu près généralisé. Il ne
faut pas oublier que, parallèlement, l'in-
dustrie pétrolière met au point des carbu-
rants et des lubrifiants permettant aux
ingénieurs motoristes l'adoption de solu-
tions de plus en plus audacieuses. Mais
une différence fondamentale existe entre
les politiques des constructeurs européens
et des constructeurs américains. Soumis à
une pression fiscale déjà démente, les pre-
miers ont recherché la réduction des
consommations, de la masse et du vol-
ume, d'où petites cylindrées et grandes
vitesses de rotation.

Pendant 6 ans (1939-1945) c'est l'arrêt
de toute recherche au grand jour dans les
pays occupés et la course à la production
chez les belligérants toujours au combat.

(*) Conférence donnée le 7 février 1980, dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour
l'Industrie Nationale.

L'aviation est la grande bénéficiaire des efforts de recherche. Mais le moteur d'automobile (particulièrement le diesel) va devoir résoudre les problèmes de son utilisation sous les climats les plus divers (désert lybien, plaine russe en plein hiver, jungles de Malaisie, etc...).

La paix revenue, le besoin d'automobiles civiles est tel que les constructeurs dont les usines sont souvent à peu près totalement détruites (Peugeot à Montbéliard-Sociaux est quasiment en ruines) reprennent la construction des modèles d'avant-guerre.

Ce sera la première période dite « pré-réglementaire 1945-1967 au cours de laquelle apparaîtra le petit diesel.

Elle sera suivie de la période « réglementaire » 1967-1974.

Puis viendra la période actuelle dite de « crise de l'énergie » que l'on peut diviser en deux :

- 1974-1979 : ou la crise larvée,
- 1979 : la vraie crise.

On étudiera donc, dans une première partie, l'évolution du moteur à allumage commandé le plus répandu au cours de ces quatre périodes.

Les problèmes qui semblaient difficilement solubles (pollution, bruit, etc...) en raison des délais d'application très courts imposés par les politiciens américains, ont paru justifier le recours à d'autres solutions :

- moteur Wankel, également à allumage commandé,

- moteur Stirling, à combustion externe.

L'électricité n'a pas été oubliée, les techniques spatiales ayant utilisé certains générateurs porteurs d'espoirs encore non confirmés.

Ces solutions ainsi que l'évolution du diesel feront l'objet de notre seconde partie.

Notre conclusion tentera d'esquisser le moteur d'automobile des années 1980.

I. LE MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE

I. A. LA PERIODE PREREGLEMENTAIRE : 1945-1967.

(A1) A l'exception de la Régie Nationale des Usines Renault qui lance la quatre chevaux, les constructeurs français reprennent la fabrication de leurs modèles d'avant-guerre : 202 pour Peugeot (au début une demi-voiture/jour, hiver 1945). 11 et 15 pour Citroën.

Des centres de recherches sont créés ou développés et organisés de manière à jouir d'une certaine autonomie vis-à-vis des autres départements des sociétés. Malgré des tâtonnements d'ordre administratif inévitables, ces centres donnent des résultats valables que traduisent les chiffres du tableau I.

Tableau I. — Progrès accomplis de 1945 à 1967 dans le domaine des performances du matériel de grande série.

Puissance par dm ³ de cylindrée	Couple maxi par dm ³ de cylindrée	Consommation
de 21 kW/l à 37 kW/l (28 ch/l) (50 ch/l)	de 65 m N/l à plus de 80 (6,5 mkg/l) (8 mkg/l)	de 300 g/kW/h à 260 g/kW/h (220 g/ch/h) (190 g/ch/h)
POUR UNE VOITURE DE 1.000 kg, VIDE		
Vitesse km/h		Consommation dm ³ /100 km (1/100 km)
70		6,8
100		8,5
130		11

A ces résultats, il faut ajouter que l'emploi de l'aluminium pour la réalisation des blocs cylindres fait descendre la masse aux environs de 2,2 kg/kW (1,6 kg/ch).

A côté du 4 cylindres classique, on voit la grande série adopter des architectures jusqu'alors peu répandues :

- Moteur horizontal à pistons opposés 2 ch. Citroën - Volkswagen);
- Refroidissement par air (2 ch. Citroën - Volkswagen);

Le cycle à 2 temps n'est adopté pratiquement que par la S.A.A.B. (Suède) qui l'abandonna par la suite et quelques constructeurs allemands (F. 102 de D.K.W. Auto-Union) qui suivront la même politique.

L'emploi de chemises « humides » facilement amovibles favorise les « opérations coup de fouet » devenues vite inutiles grâce aux progrès des filtres à air et à huile et à ceux de la chimie des additifs pour lubrifiants.

Les coussinets minces, bénéficiant des avantages d'une fabrication continue en grande série assurent une longévité remarquable aux paliers des moteurs. Au cas où une réparation s'avère nécessaire, il est facile de les démonter et de les remplacer. L'opération de réglage, toujours délicate à effectuer est supprimée.

Les progrès des carburants (nombres d'octane élevés) permettent des rapports volumétriques élevés (8 à 9, certains vont même jusqu'à 11 comme A, C, sur Cobra). Cela permet de bons rendements.

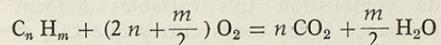
Ces perfectionnements, joints à de nombreux autres portant sur des points de détail (dessin des pistons, conception des segmentations, etc...) font que, dès cette période, les moteurs de certains constructeurs atteignent et dépassent les 100 000 km.

Le moteur à allumage commandé européen et particulièrement le moteur français atteint à la fin de cette période un degré de développement qui contraste avec celui des Américains.

Ces progrès ne sont qu'un premier stade. D'autres vont venir quand les politiciens s'en mêlent et c'est :

I. B. LA PERIODE REGLEMENTAIRE 1967-1974.

I. B1. Le phénomène physique fondamental qui assure le fonctionnement de tous les moteurs à combustion interne utilisant les hydrocarbures est la combustion avec l'oxygène de l'air qui s'effectue suivant l'équation :



Cette équation montre qu'en moyenne la combustion d'un kilogramme de carburant exige 15 kg d'air. En pratique on n'atteint jamais ces proportions idéales. On peut accidentellement, mais surtout volontairement mettre plus ou moins d'air que ne l'exige l'équation ci-dessus.

En France on utilise comme repère :

$$\text{la richesse } (r) = \frac{\text{poids d'air}}{\text{poids de carburant}}$$

En Allemagne et dans d'autres pays, le rapport d'air :

$$\lambda = \frac{\text{quantité d'air pratiquement admise}}{\text{quantité théoriquement nécessaire}}$$

On appelle *mélange pauvre* un mélange trop riche en air, donc trop pauvre en carburant, et *mélange riche* un mélange trop pauvre en air, donc trop riche en carburant.

I. B2. Le moteur à allumage commandé :

— donne sa puissance maximale avec les mélanges riches :

$$13 < r < 15 ; \lambda = 1 \text{ à } 0,9$$

— atteint sa consommation minimale avec les mélanges pauvres :

$$(r = 16 ; \lambda = 1,1)$$

— tourne correctement à vide et permet un passage aisément des vitesses avec les mélanges très riches :

$$(r = 11 ; \lambda = 0,7)$$

Dans ce cas, le combustible est mal utilisé et les gaz d'échappement renferme-

ront d'autres composés que du dioxyde de carbone et de l'eau :

— s'il y a excès d'air, la puissance est diminuée. Du fait du ralentissement de la combustion, la température du moteur s'élève ;

— si la richesse est inférieure à 11 ou supérieure à 18 ($0,7 < \lambda < 1,25$), le mélange ne s'enflamme pas (limites d'inflammabilité).

I. B3. Comme on le voit, ces conditions de combustion très variables donnent naissance à des corps autres que CO_2 et H_2O , notamment :

— des « imbrûlés » — hydrocarbures ;

— des produits partiellement oxygénés :

Aldéhydes : $\text{C}_n\text{H}_m\text{CHO}$,

Cétones : $\text{C}_n\text{H}_m\text{CO}$,

Acides : $\text{C}_n\text{H}_m\text{CO}_2\text{H}$,

Produits irritants,

— et de l'oxyde de carbone CO, produit

toxique mais très fugace (se diffusant très vite dans l'air ambiant).

Il s'y ajoute de très petites quantités de carbures polycycliques et, éventuellement, des suies.

I. B4. La combustion s'effectue dans de l'air, donc en présence d'un fort pourcentage d'azote. Elle est amorcée par une étincelle électrique. L'exemple de l'industrie norvégienne de l'azote, nous apprend que l'on va former des oxydes d'azote. Ces produits se transformant très rapidement les uns dans les autres on leur donne pour formule générale NO_x .

I. B5. On trouve également des particules (oxydes ou sels halogénés de plomb) provenant des additifs destinés à améliorer le fonctionnement des moteurs à rapport volumétrique (taux de compression) élevé.

I. B6. Les quantités sont évidemment très différentes. Le tableau II donne des valeurs moyennes.

Tableau. II. — *Composés présents dans l'échappement d'un moteur à allumage commandé ramenés à une consommation de 100 dm³ de carburant.*

CO	10 à 15 kg
H_mC_n	0,3 à 0,6 kg
NO_x	0,3 à 1,5 kg
$\text{C}_n\text{H}_m\text{CHO}$	60 g
SO_2	30 g
$\text{C}_n\text{H}_m\text{CO}_2\text{H}$	24 g
Solides minéraux	30 à 60 g

I. B7. On conçoit qu'une concentration de véhicules dans un espace mal ventilé puisse rendre l'air sinon irrespirable, du moins dangereux pour des personnes atteintes d'affections pulmonaires et irritant pour les autres.

D'où la nécessité d'intervenir pour sinon supprimer cette nuisance, du moins pour l'atténuer dans toute la mesure du possible.

C'est de Californie qu'est partie la vague de réglementations qui a déferlé sur l'in-

dustrie automobile des Etats-Unis et, par elle, sur celle du monde entier.

Elle est justifiée par les conditions atmosphériques très particulières qui règnent sur la ville de Los Angeles (inversion de température des hautes couches de l'atmosphère) (fig. 1).

Mais les conditions dans lesquelles cette réglementation a été imposée et discutée sont des plus critiquables. (Aux U.S.A. délais d'application très courts, incomptence démagogique des responsables).

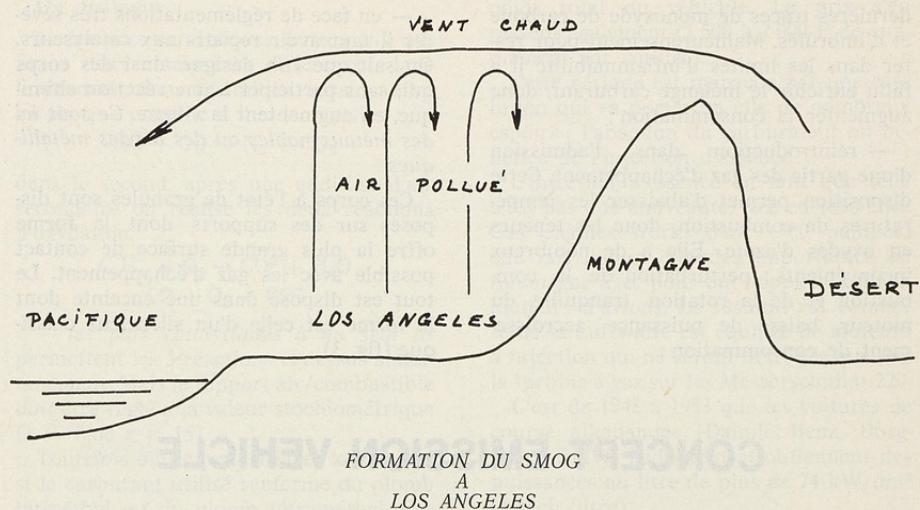


Fig. 1. — Le courant d'air chaud venant du désert, défecté par les montagnes entourant la ville, empêche l'air pollué de s'échapper.

I. B8. Quoiqu'il en soit, l'industrie automobile a réussi jusqu'ici à respecter cette réglementation.

Les polluants retenus sont au nombre de trois :

- monoxyde de carbone ;
- imbrûlés ;
- oxydes d'azote.

La liste des dispositions prises pour les éliminer est impressionnante :

— renvoi dans l'admission des gaz contenus dans le carter : vapeurs d'huile et gaz de combustion ou mélange carburé ayant passé à travers la segmentation (blow-by) ;

— renvoi dans l'admission des vapeurs de carburant provenant du réservoir (désormais étanche) et, lors d'un arrêt, de la cuve du carburateur.

En effet, l'essence contenue dans cette cuve se vaporise sous l'action de la température élevée régnant sous le capot. Elle est absorbée par une cartouche de charbon actif. Elle s'en dégage lorsque le moteur est remis en route, sous l'effet de la chaleur et de la dépression (fig. 2) :

- réglages pauvres des moteurs ;
- décalage du ralenti en marche normale avec retour automatique à sa position en cas d'arrêt du véhicule (Copolair) ;
- réduction de l'avance à l'allumage ;
- injection d'air frais à la sortie des soupapes d'échappement pour brûler les

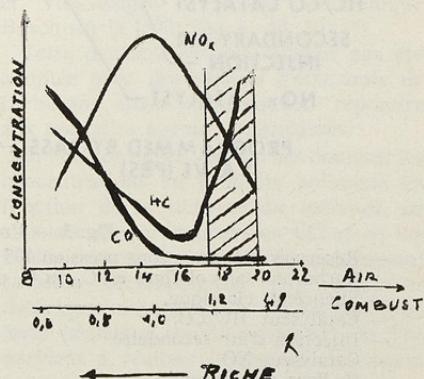


Fig. 2. — Concentrations en polluants en fonction de la richesse ou du nombre d'air.

dernières traces de monoxyde de carbone et d'imbrûlés. Malheureusement pour rester dans les limites d'inflammabilité il a fallu enrichir le mélange carburant, donc augmenter la consommation ;

— réintroduction dans l'admission d'une partie des gaz d'échappement. Cette disposition permet d'abaisser les températures de combustion, donc les teneurs en oxydes d'azote. Elle a de nombreux inconvénients : perturbation de la combustion et de la rotation tranquille du moteur, baisse de puissance, accroissement de consommation ;

— en face de réglementations très sévères il faut avoir recours aux catalyseurs. On sait que l'on désigne ainsi des corps qui, sans participer à une réaction chimique, en augmentent la vitesse. *Ce sont ici des métaux nobles ou des oxydes métalliques.*

Ces corps à l'état de granules sont disposés sur des supports dont la forme offre la plus grande surface de contact possible avec les gaz d'échappement. Le tout est disposé dans une enceinte dont la forme est celle d'un silencieux classique (fig. 3).

CONCEPT EMISSION VEHICLE

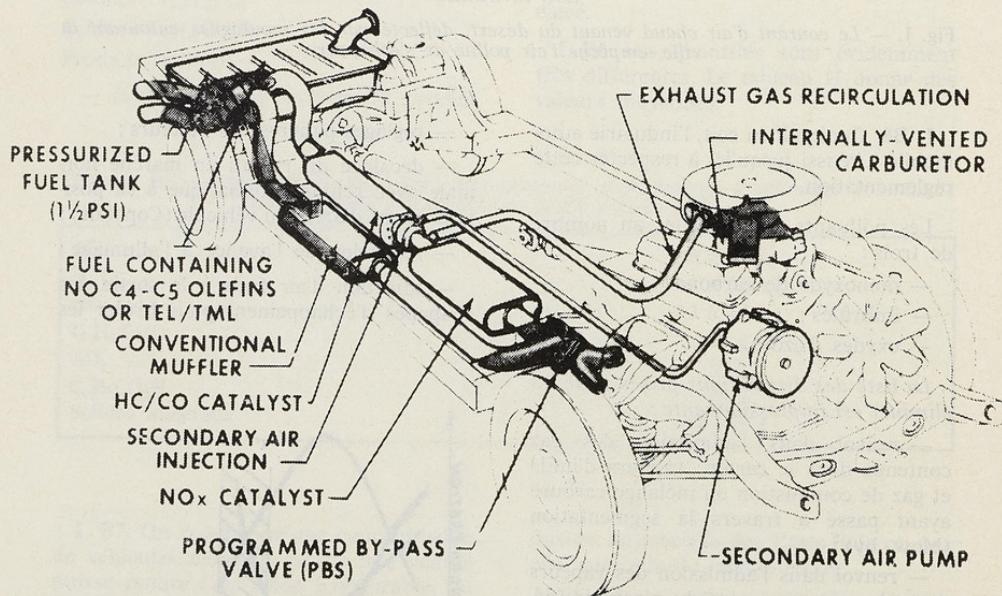
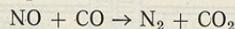


Fig. 3. — Voiture « dépolluée »

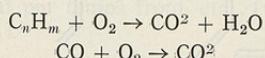
- Réservoir d'essence sous pression 105 kPa.
- Carburant sans olefines en C₄ ou C₅ et sans plomb tétraethyl ou méthyl.
- Silencieux classique.
- Catalyseur HC/CO.
- Injection d'air secondaire.
- Catalyseur NO_x.
- By-Pass programmé.
- Recirculation des gaz d'échappement.
- Carburateur à ventilation interne.
- Pompe d'air secondaire.

On distingue :

— les pots catalytiques à deux lits utilisant deux catalyseurs différents : dans le premier, dans un milieu aussi pauvre en air que possible a lieu la réaction :



dans le second, après une addition d'air secondaire on réalise les deux réactions d'oxydation :



— les pots catalytiques à un seul lit permettent les 3 réactions ci-dessus simultanément. Mais le rapport air/combustible doit être réglé à la valeur stochiométrique ($\lambda = 1$ ou $r = 15$).

Toutefois on ne peut utiliser la catalyse si le carburant utilisé renferme du plomb tétraéthyl ou du plomb tétraméthyl. Ces additifs (moins d'un gramme par litre) permettent les grands rapports volumétriques autorisant les puissances élevées au litre de cylindrée sans que l'on ait à redouter des anomalies de combustion. Mais ce sont des poisons pour les catalyseurs.

On a proposé des « pièges à plomb » en amont des pots catalytiques. Il ne semble pas que l'idée ait connu un certain succès.

I. B9. Tout cela a conduit à ajouter à un moteur tout un surcroît d'accessoires et de canalisations, sans oublier les dispositifs de sécurité contre les allumages en retour (ratés d'allumage), les entraînements d'huile, etc...

Certaines réglementations prévoient même que le catalyseur doit être porté à sa température d'efficacité (quelques centaines de degrés) avant que le moteur ne soit mis en marche. Il faudra donc monter des éléments chauffants qui prélèveront leur énergie sur la batterie qui devra être plus grosse et plus lourde, ainsi que l'alternateur.

Dans l'état actuel des choses, il résulte de l'adoption de ces mesures, en bloc ou en détail, des suppléments de poids des moteurs, de leur consommation propre, compte non tenu de l'accroissement de consommation dû à l'augmentation du

poids total du véhicule. Le prix s'en ressent également (1 500 à 2 000 F de supplément par voiture).

Cette période est marquée par une évolution qui va porter en elle de nombreux espoirs : l'abandon du carburateur au bénéfice de l'injection d'essence.

L'injection d'essence en tant que telle n'est pas une nouveauté. Née en 1898 chez Gas Engines Works Deuz (300 pompes) elle fait l'objet d'études importantes en Allemagne avec pour but l'application aux moteurs d'avions. Le résultat est connu : toute la Luftwaffe est équipée de moteurs à injection qui ne seront détrônés que par la turbine à gaz sur les Messerschmidt 220.

C'est de 1948 à 1953 que les voitures de course allemandes (Daimler-Benz, Borgward, BMW) l'adoptent et obtiennent des puissances au litre de plus de 74 kW/dm³ (100 ch./litre).

Les 24 heures du Mans de 1956 gagnées par Jaguar sur un véhicule équipé d'un système d'injection Lucas, mettent en relief un des avantages essentiels de l'injection : la réduction de la consommation.

En effet, cette année-là, les concurrents ne disposaient que d'une quantité donnée de carburant et nombreux ont été ceux qui ont dû abandonner pour « panne sèche ».

Ce succès confirme les possibilités d'industrialisation. Déjà, en 1953, Mercédès offre l'injection en option sur ses voitures de haut de gamme. Puis c'est Peugeot (injection mécanique Kugelfisher sur 404) et Volkswagen (injection électronique Bosch sur la 1600) (fig. 4 - A2, A3) (*).

Cette dernière formule n'avait pas été adoptée pour des raisons d'économie de carburant, mais pour pouvoir répondre aux nouvelles normes américaines.

Si l'on considère les courbes donnant les concentrations en produits polluants en fonction de la richesse du mélange, on constate que les teneurs en CO et en imbrûlés passent par un minimum pour une richesse correspondant aux quantités théoriques assurant une combustion parfaite (richesse stochiométrique). Si l'on parvient à réaliser le réglage correspon-

(*) Les références A2, A3, etc... concernent la bibliographie.

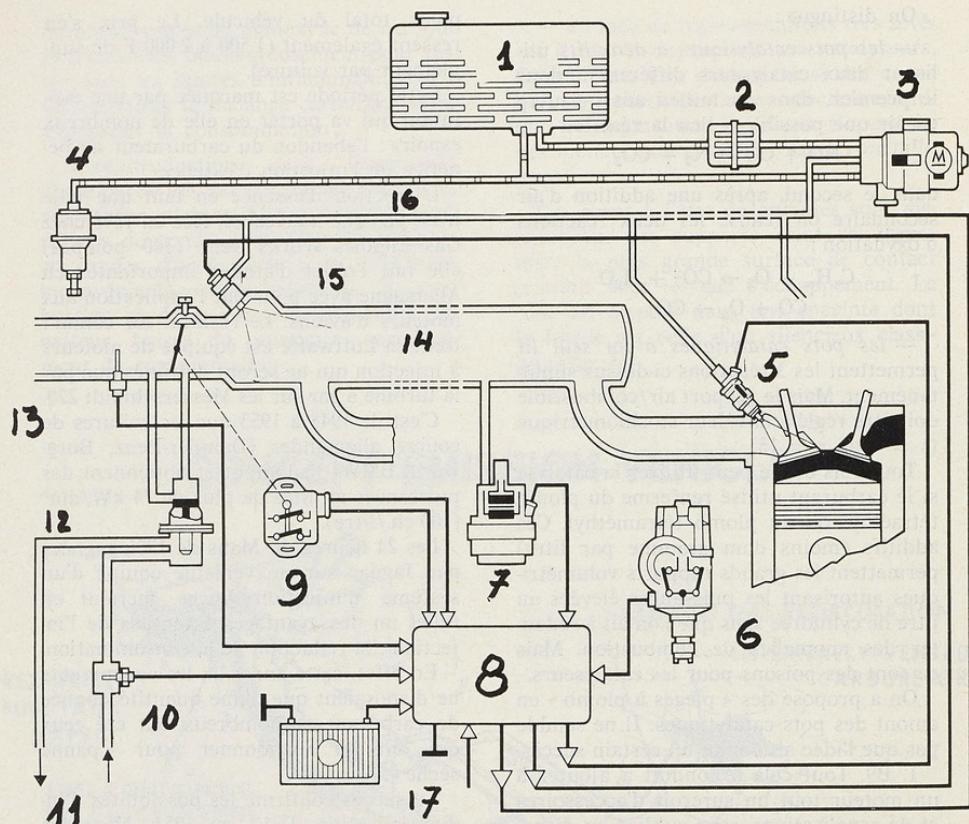


Fig. 4. — Schéma de principe de l'injection électronique Bosch jetronic

- | | |
|---|---|
| 1. Réservoir d'essence, | 9. Interrupteur de papillon, |
| 2. Filtre à essence, | 10. Sonde de température eau, |
| 3. Pompe électrique à essence, | 11. Liaisons au radiateur, |
| 4. Régulateur de pression d'essence, | 12. Tiroir d'air additionnel, |
| 5. Injecteur, | 13. Sonde de température air. |
| 6. Allumeur avec contacts de déclenchement, | 14. Pipe d'admission, |
| 7. Sonde de pression, | 15. Injecteur de départ à froid, |
| 8. Organe central de calcul, | 16. Canalisation d'essence sous pression. |
| | 17. Vers la commande du démarreur. |

est financé par l'industrie automobile, dont les fabricants de moteurs doivent faire face à des problèmes de pollution croissante. Cependant, à toutes les allures et dans toutes les circonstances normales d'exploitation, il ne restera plus que les oxydes d'azote à réduire ou à éliminer. Cela peut se faire par recirculation de gaz d'échappement ou par emploi de catalyseurs appropriés.

Il faut donc :

— mesurer l'air admis dans le cylindre ;

— injecter la quantité de carburant juste nécessaire.

La mesure de l'air admis dans le cylindre se fait par l'intermédiaire de la pression absolue dans l'admission à l'aide d'un capteur à induction.

Le dosage de ce carburant se fera en agissant sur la durée d'ouverture d'un injecteur commandé par électro-vanne.

Cette durée sera déterminée par un calculateur embarqué qui tiendra compte de tous les paramètres tels que, par exemple :

- paramètres d'utilisation du véhicule : vitesse - couple ;
- ambiance : température d'air, d'eau, d'huile, de la culasse ;
- conditions provisoires de fonctionnement : démarrage et mise en action, notamment par temps froid, etc... (voir Annexe A1).

I. C. 1974-1979 - La crise de l'énergie - La crise larvée.

A la progression du prix du pétrole « brut » s'ajoutent des rumeurs d'épuisement des puits ou de limitation des productions. Les gouvernements prennent des mesures pour limiter la « facture pétrolière ».

Du côté des constructeurs, l'argument « consommation » qui n'avait jamais été oublié par les services commerciaux retrouve toute sa valeur.

Les moteurs classiques par une étude plus approfondie de leurs circuits d'admission d'air, et également des échappements, sont arrivés, au moins en Europe, à rattraper les suppléments de consommation entraînés par les systèmes anti-pollution. La voiture courante se maintient en-dessous de 9 dm³/100 km à 120/130 kmh.

Il est vrai que ce résultat est dû non seulement aux améliorations apportées au moteur, mais aussi à toutes les dispositions prises pour diminuer la résistance à l'avancement du véhicule notamment dans le domaine de l'aérodynamique et dans celui des pneumatiques.

Le succès de l'injection électronique a orienté les esprits des chercheurs vers les possibilités qu'offre le recours à l'électronique. Le microprocesseur, mis en grande quantité sur le marché pendant cette période va diffuser les techniques digitales jusqu'alors apanage des informaticiens. Les semi-conducteurs donnent les composants (diodes, transistors, thyristors, thermistances, etc...) permettant toutes les opérations de coupure du courant, coupure totale ou dans un seul sens, d'amplification, de modulation par un paramètre physique, etc...

La miniaturisation des circuits amène le concept des « cartes » simplifiant les dépannages.

Le moteur classique va bénéficier de cet apport technique. L'allumage classique utilisant l'extra-courant de rupture d'un circuit à forte self fait place à un système à transistor, d'où tout contact est banni (A4).

Dès le début de cette période aux U.S.A., toutes les voitures particulières sont équipées d'un allumeur à transistor.

En Europe, la proportion n'est encore que de 20 % environ mais avec une nette tendance à l'accroissement.

Les avantages apportés sont un accroissement de l'énergie disponible pour l'allumage, un nombre élevé d'étincelles et un meilleur rendement de tout l'allumeur. Il faut y ajouter la constance du point d'allumage et la disparition des ennuis dûs aux « vis platinées » qui n'existent plus dans ce type d'équipement. Il en résulte un maintien de la consommation initiale qui, avec un équipement classique, peut augmenter de 3 à 5 % par suite de la variation de l'avance.

La recherche d'un bon fonctionnement avec des mélanges pauvres (r voisin de 17, λ de 1,2) est un des acquis des allumeurs à transistors. De tels mélanges donnent des consommations minimales et des émissions de polluants réduites. Si l'on dépasse cette limite, les émissions de polluants remontent et le couple moteur devient instable. L'allumeur à transistor avec sa durée d'étincelle plus longue et son énergie d'étincelle plus élevée permet d'atteindre et même de dépasser légèrement cette limite. Le gain en consommation est alors de 7 % (A5) fig. 5 et 6).

Au cours de la même période, on voit se confirmer le développement de la sonde lambda. Cette sonde utilise le fait qu'à partir d'une température de 300 °C, son matériau (dioxyde de zirconium) devient conducteur pour les ions oxygène. Sa constitution est la suivante : une partie de l'élément en dioxyde de zirconium est plongée dans le gaz d'échappement. Une

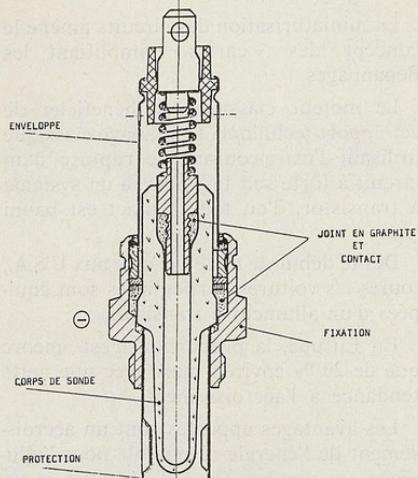


Fig. 5. — Sonde

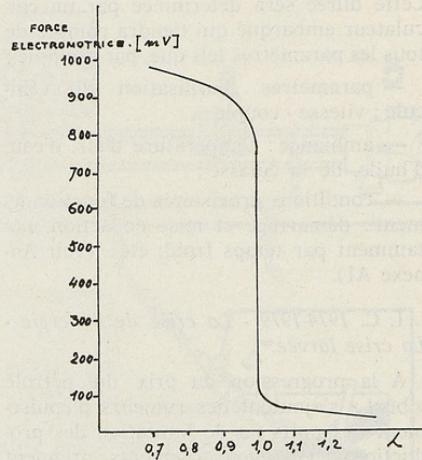
FIGURE 6
CARACTÉRISTIQUE D'UNE SONDE

Fig. 6. — Caractéristique d'une sonde

autre partie est exposée à l'air extérieur. La surface porte des électrodes poreuses en platine. La partie de cette surface soumise aux gaz d'échappement reçoit une protection en céramique poreuse contre les produits résiduels de combustion présents dans les gaz d'échappement.

Dès que la température atteint 300 °C, une différence de potentiel apparaît entre les deux électrodes. Cette différence de potentiel peut donc servir à mesurer l'oxygène non utilisé pour la combustion, donc la richesse du mélange.

En outre, la variation très brutale de la caractérisation aux environs de $r = 15$ ($\lambda = 1$) permet d'utiliser la différence de potentiel comme valeur de consigne pour le réglage de la durée d'injection dans un système électronique. Cela peut être précieux lorsque l'on est obligé d'utiliser des catalyseurs.

I. D. 1979 à La vraie crise.

Les prix du brut continuent d'augmenter par paliers de plus en plus élevés et de plus en plus rapprochés dans le temps.

S'y ajoutent les leçons de morale des nouveaux riches.

Deux politiques sont possibles dans un avenir pas trop éloigné pour amortir les effets désastreux de la situation :

- poursuivre les progrès du moteur à allumage commandé ;
- modifier la politique des carburants.

I. D1. Puisque l'électronique est une voie possible, pourquoi ne pas aller plus loin ?

i) L'emploi du calculateur embarqué bénéficie dorénavant des progrès de l'allumage électronique et de ceux des micro-mémoires qui permettent d'enregistrer un nombre considérable de caractéristiques. Vitesse, charge, températures, teneur en oxygène de l'échappement, rapport de boîte de vitesse utilisé, etc... sont entrés dans ce calculateur qui délivre les ordres réglant l'avance optimale à l'allumage, la quantité d'essence injectée, la proportion recyclée de gaz d'échappement, de façon à optimaliser *en même temps* l'épuréation d'échappement, la consommation, la tranquille rotation du moteur, etc.

SYSTEME MOTRONIC - B.M.W. - 3,2 dm³

1. Pompe à essence,
2. Filtre,
3. Régulateur de pression,
4. Injection de départ à froid,
5. Air additionnel,
6. Injecteur,
7. Distributeur,
8. Bobine,
9. Interrupteur de papillon,
10. Interrupteur temporisé (température),
11. Débitmètre air,
12. Température air
13. Sonde de température,
14. Tachymètre,
15. Repère angles,
16. Roue dentée,
17. Calculateur électronique,
18. Interrupteur démarreur.

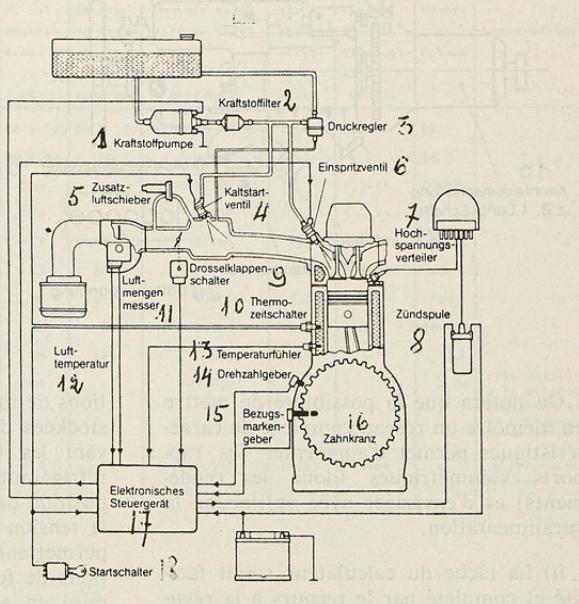
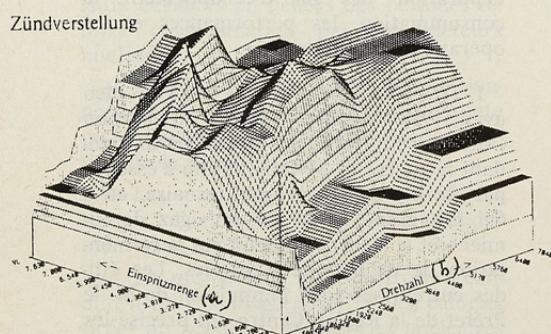
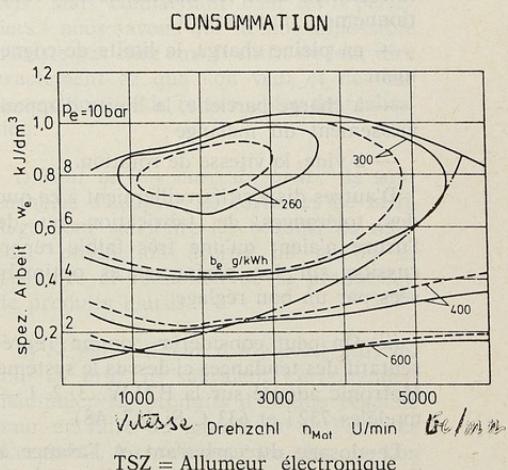


Schéma général



Caractéristiques de réglage optimal
de l'avance à l'allumage
a) Quantité injectée, b) Vitesse
c) Avance à l'allumage



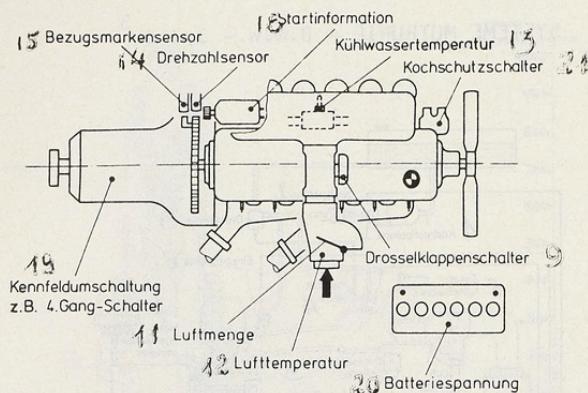


Fig. 7

IMPLANTATION

19. Changement de réseaux
(Ex.: passage en 4^e),
20. Tension batterie,
21. Protection thermique,

On notera que la possibilité de mettre en mémoire un réseau complexe de caractéristiques permet d'augmenter les rapports volumétriques (donc les rendements) et d'envisager avec optimisme la suralimentation.

ii) La tâche du calculateur serait facilité et complété par le recours à la *régulation* (A6).

Des circuits régulateurs surveilleront le maintien dans les limites de bon fonctionnement, notamment :

- en pleine charge, la limite de cognement ;
- à charge partielle, la limite d'appauvrissement du mélange ;
- à vide, la vitesse de rotation.

D'autres dispositifs veilleront à ce que des tolérances de fabrication ou de l'usure n'aient qu'une très faible répercussion sur les performances optimalisées par un bon réglage.

iii) On peut considérer comme représentatif des tendances ci-dessus le système Motronic adopté sur la B.M.W., 3, 2, 1 — modèles 732 i et 633 C Si (A7, A8).

Le dosage du carburant et l'avance à l'allumage sont déterminés par un microcalculateur. En ce qui concerne l'avance, une série de points d'allumage précis a été déterminée pour les diverses condi-

tions de fonctionnement. Les valeurs sont stockées dans une mémoire (ROM). Suivant les variations de température du réfrigérant et de l'air d'admission, de la position de la pédale d'accélérateur ou de la tension de la batterie, des corrections permettent d'optimiser toutes les conditions de fonctionnement : mise en route, mise en action, ralenti, charge partielle ou pleine charge, coupure d'alimentation pendant les décélérations.

On réalise ainsi un compromis entre l'épuration des gaz d'échappement, la consommation, les performances et les opérations d'entretien.

I. D2. Tout a été dit et essayé bien avant 1939 : synthèse à partir du charbon (Allemagne : 7 millions de tonnes/an pendant la guerre de 39-45), dilution d'essence par de l'alcool, carburant ternaire, etc... On fait grand bruit sur le « gaz de fumier » et le méthane obtenu par la fermentation de déchets cellulosaques. Les études entreprises sous l'impulsion de M. le Préfet de la Région Centre ont précisé les conditions de rentabilité. Il faut d'importantes installations.

De fait, le moteur à allumage commandé peut brûler un grand nombre de corps liquides ou gazeux... avec plus ou moins de succès (voir Tableau III). Une utilisation optimale implique une adaptation du moteur à chaque carburant. Soulignons

TABLEAU III

PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ESSENTIELLES DE CARBURANTS ESSAYES AVEC SUCCES.

Corps	Masse Volumique kg/m ³	Pt de fusion °C	Pt d'ébullition °C	Chaleur de vaporisation kcal/kg	Pouvoir calorifique inférieur kcal/kg	Air théorique d'incinération kg/kg	Limite d'inflammabilité % Vol.	Nombre d' Octane	Observations
Essence ordinaire	720-740	-30 à -50	40 à 120	90 à 120	9.800 à 10.500	13,8	0,6-8	88	
Super	750-780	---	40 à 200	100	10.200	14,2	" "	98	
Gaz "Butane"	2,25	-135	-30	-	11.000	15,5	1,5-15	89-94	
Methane	0,72	-184	-162	-	11.950	17,2	5 - 15	> 160	
CO	1,25	-205	-191	-	2.400	2,5	12,5-75	≠ 100	
Methanol	800	-98	65	265	4.700	6,4	5,5-26	160	
Ethanol	800	-114	78	216	6.400	9,0	3,5-15	160	
Benzol	880	+ 6	80	94	9.600	13,3	1,2-8	98-115	
Acetone	790	-95	58	125	6.800	9,4	2,5-13	> 100	
Hydrogène	0,09	-	-253	-	28.650	34	4 - 77	> 60	très sensible à la propriété des chambres de combustion la dilution...
Acétylène	1,17	-84	-81	-	11.300	13,25	1,5-80	-	Extrêmement brisant

le caractère irrationnel (pour rester poli) des propositions faites pour utiliser à la production d'hydrogène carburant les chaleurs dégagées en dehors des périodes de forte consommation par les réacteurs nucléaires.

— Même les surrégénérateurs ne donnent pas de gaz à température suffisante pour obtenir de l'hydrogène par dissociation de la vapeur d'eau.

— Les procédés purement chimiques (filière à l'acide iodhydrique) donnent des montagnes de déchets.

— La préparation par électrolyse conduit à un gaspillage de 91 % des calories tirées du réacteur. 100 calories nucléaires transformées en électricité donnent l'équivalent de 40 calories. Après transport et électrolyse, l'énergie potentielle contenue dans l'hydrogène n'en représente plus que 36. Ces 36 calories transformées en énergie mécanique dans un moteur à combustion interne classique donnent l'équivalent de 9 calories.

N'étant pas un technicien du pétrole nous nous garderons bien de donner un avis. Mais connaissant bien les « pétroliers » nous savons que le mot impossible n'existe pas chez eux. Il suffit de leur dire exactement ce que l'on veut et de leur laisser des délais raisonnables de réalisation.

i) *Tant qu'il y aura du brut*; ils sont capables d'adapter les formules de raffinage pour satisfaire les besoins du marché: production accrue du gas-oil et d'essence et réduction de la production de produits lourds.

ii) *Si par malheur il n'y avait plus du tout de brut*, ils sauraient certainement manipuler les produits d'origine végétale pour en faire du gaz-oil ou de l'essence acceptable. A condition, bien sûr, que l'on ait prévu l'ensemencement, la croissance et la récolte en temps et quantités adéquats. (Il faut une année pour qu'un végétal accomplisse son cycle d'évolution).

*II. — LES CONCURRENTS POSSIBLES
OU MOTEUR A L'ALLUMAGE
COMMANDE*

II. LE MOTEUR DIESEL (B1).

Dans cet exposé on ne traitera que du moteur d'automobile. En ce qui concerne les véhicules industriels le diesel a pratiquement éliminé, en Europe tout au moins, le moteur à allumage commandé. La turbine à gaz n'a pas encore pu le remplacer, même pour les gros tonnages.

Le moteur diesel a aujourd'hui 88 ans. Mais c'est en 1922 seulement que les recherches de l'ingénieur Tartrais aboutissent au premier moteur « à huile lourde » à grande vitesse de rotation.

En 1936, Peugeot lance le HL 50 sur camionnettes et Citroën son 4 cylindres 1 767 cm³ (30 kW [40 ch.] à 3 500 tr/mn).

A la même époque Mercédès est le premier à équiper des voitures particulières (206 D) d'un diesel de 33 kW (45 ch.) à 3 000 tr/mn.

II. A1. Période préréglementaire - 1945-1967.

Dès que la production peut reprendre, Mercédès met sur le marché la 170 D, suivie de Borgward.

En France ce n'est qu'en 1959 que Peugeot présente une version 403 Diesel.

II. A1. a) Avant d'aller plus loin, il convient de rappeler quelques particularités du principe du moteur diesel.

— Le carburant est un liquide de densité comprise entre 0,81 et 0,85 contenant en poids 86 % de carbone et 13 % d'hydrogène. Beaucoup moins volatile que l'essence (ébullition entre 150 et 360 °C) il ne peut être utilisé dans un carburateur.

— Dans un moteur, il faut, pour qu'il s'enflamme l'injecter dans de l'air qu'une compression de l'ordre de 2 MPa à 5 MPa (20 kg/cm² à 55 kg/cm²) a porté à une température de 700 à 900 °C. L'inflammation du combustible ne se produit jamais instantanément, un certain temps s'écoule

entre le début de l'injection et la première flamme, dit « délai d'inflammation ».

— Le temps qui s'écoule entre le début de l'injection et la fin est de l'ordre du millième de seconde à la puissance maximale. Ce temps est trop court pour que le combustible injecté à chaque cycle utilise la totalité de l'air admis. Il y a donc excès d'air.

— S'effectuant dans une enceinte sous pression qui constitue une véritable « bombe calorimétrique » la combustion est très complète et les taux de polluants, notamment celui du CO, beaucoup plus faibles que ceux que donne le moteur à allumage commandé.

— Dans la zone du couple maximal (environ 2 000 tr/mn) les meilleurs systèmes de combustion ne permettent pas d'utiliser plus de 80 % de l'air admis. Au-delà de cette limite, les conditions idéales de combustion ne sont plus réalisées. Il y a formation de « suies » (fumée noire à l'échappement) et augmentation des consommations.

— Le temps très court disponible pour la combustion limite la vitesse de rotation. A 6 000 tr/mn on ne disposerait que de 5 millisecondes par cycle dans un quatre temps.

II. A1. b) Les considérations précédentes permettent de mieux comprendre pourquoi les performances des diesels de voitures particulières sont plus faibles que celles des moteurs à allumage commandé. Pour un 4 cylindre 4 temps :

— Couple maxi : 60 mN/dm³ (valeur moyenne) (6 mkg/l) quelle que soit la cylindrée.

— Puissance maxi : 24 à 25 kW/dm³ (33 à 34 ch/l) ; pour les cylindrées de moins de 1,5 dm³, 22 kW/dm³ (30 ch/l) ; pour les cylindrées supérieures à 2 litres.

C'est la raison pour laquelle les constructeurs adoptent pour la version diesel d'un véhicule un moteur de cylindrée supérieure à celle du moteur à essence : 7 à 15 % pour les cylindrées comprises entre 2 et 2,5 litres. Jusqu'à 35 % pour les petites cylindrées (V.-W. Golf).

Les consommations sont en principe plus faibles que celles du moteur à allumage commandé à carburateur, surtout à charge partielle, ce qui est un grand avantage du diesel.

II. A1. c) Cet avantage a parfois été remis en question. En effet, l'utilisation du véhicule peut conduire à des résultats très différents. Une discussion sérieuse conduit aux résultats suivants :

Tableau IV

	Ecart volumique	Ecart massique
Utilisation urbaine	30 %	20 %
Utilisation sur route	15 %	5 %
Utilisation sur autoroute $V_m = 120 \text{ km/h}$	5 %	— 7 %

Ce tableau amène à se poser la question suivante :

Faut-il exprimer les consommations en masse ou en volume ?

Pour *l'utilisateur* qui paye au litre, c'est la consommation en litres/100 km ($\text{dm}^3/100 \text{ km}$) qui intéresse :

Pour *l'économie nationale* c'est la consommation du brut qu'il faut considérer.

Pour obtenir 7 637 kcal essence (1 dm^3) il faut consommer 1 319 kcal d'énergie. Donc 1 dm^3 essence = 8 956 kcal.

Pour 1 dm^3 de gaz-oil il faut 8 529 + 291 = 8 820 kcal, ce qui justifie le recours à la consommation volumique.

II. A1. d) Cela posé on peut revenir à l'évolution du diesel pendant la période 1945-1967.

En général, les constructeurs cherchent à faire des moteurs aussi voisins que possible des moteurs à essence qu'ils vont remplacer sur un véhicule donné.

Les succès de Mercédès et de Peugeot déclenchent un mouvement en faveur du diesel qui ne fait qu'accentuer ses chiffres de production (4 % de la production totale, toujours en accroissement chez Peugeot p. ex.).

Les recherches porteront sur les chambres de combustion permettant d'obtenir la puissance maximale sans apparition des fumées.

Les moteurs réalisés jusqu'à ce jour utiliseront tous des systèmes de combustion à « injection indirecte » (chambre de turbulence et chambre de pré-combustion) qui permettent les meilleurs compromis entre performances, consommations, bruit de fonctionnement, émission de polluants et démarrage à froid.

Les alliages légers sont utilisés au maximum : culasse, bloc cylindre (souvent commun avec celui de la version essence pour les cylindrées de moins de 2 litres), pistons, etc...

La seule réglementation en vigueur est celle concernant les fumées.

II. A2. Période réglementaire 1967-1974.

Les réglementations « pollution » ne touchent pas les petits diesels qui doivent répondre à d'autres réglementations, notamment celles relatives au bruit qui, il est vrai, concerne le véhicule.

II. A3. 1974 à ... La crise de l'énergie.

II. A3 a) Pour le diesel, la crise de l'énergie offre un regain d'intérêt. On voit

bien poindre aux U.S.A. des réglementations sur les polluants diesel que les voitures européennes équipées de diesel respectent sans recourir à l'arsenal nécessaire au moteur à essence. Mais à partir de 1980, un règlementation plus draconienne portant sur les émissions gazeuses, les particules et les polluants non encore réglementés (Essais « cancérogènes », « mutagènes », etc...), va se mettre en place exigeant une refonte complète de l'architecture du moteur.

Le moment paraît plutôt mal choisi, car après des travaux de mise au point longs et délicats, la suralimentation, bien rodée sur les véhicules industriels, fait son apparition sur les petits moteurs.

Pour les moteurs de cylindrée comprise entre 2 et 3 litres, on arrive aux 80 mN/dm³ (8. m kg/litre) des moteurs à essence. Le résultat est moins favorable pour les puissances qui restent comprises entre 25,8 et 28 kW/dm³ (35 et 38 ch/l). La figure 8 montre les gains obtenus.

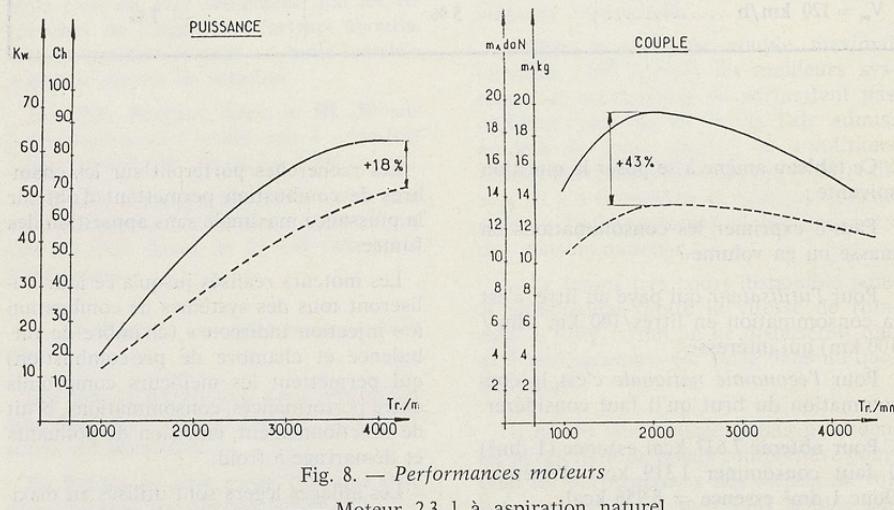


Fig. 8. — Performances moteurs

— Moteur 2,3 l à aspiration naturel
— Moteur 2,3 l avec turbocompresseur

II. A3. b) Tous ces progrès amènent à se poser la question suivante : « L'accroissement du parc de voitures particulières à moteur diesel ne va-t-il pas poser des problèmes de disponibilité de gas-oil ? »

Il semble que la réponse soit « non ».

— la part de distillat utilisée sous forme de gas-oil est faible relativement au total de la production de distillat 7-10⁶ tonnes/37.10⁶ tonnes en 1975. (La part principale est utilisée pour le chauffage domestique) ;

— sur les 7 millions de tonnes, l'essentiel est consommé par les véhicules de transports lourds (camions, locomotives) déjà diesélisées à 100 % ;

— la nécessité de craquer des fuels lourds dans l'avenir (multiplication des centrales nucléaires) pourrait permettre de produire du gas-oil si nécessaire.

II. A3. c) Comment se présenterait le problème du combustible de remplacement ?

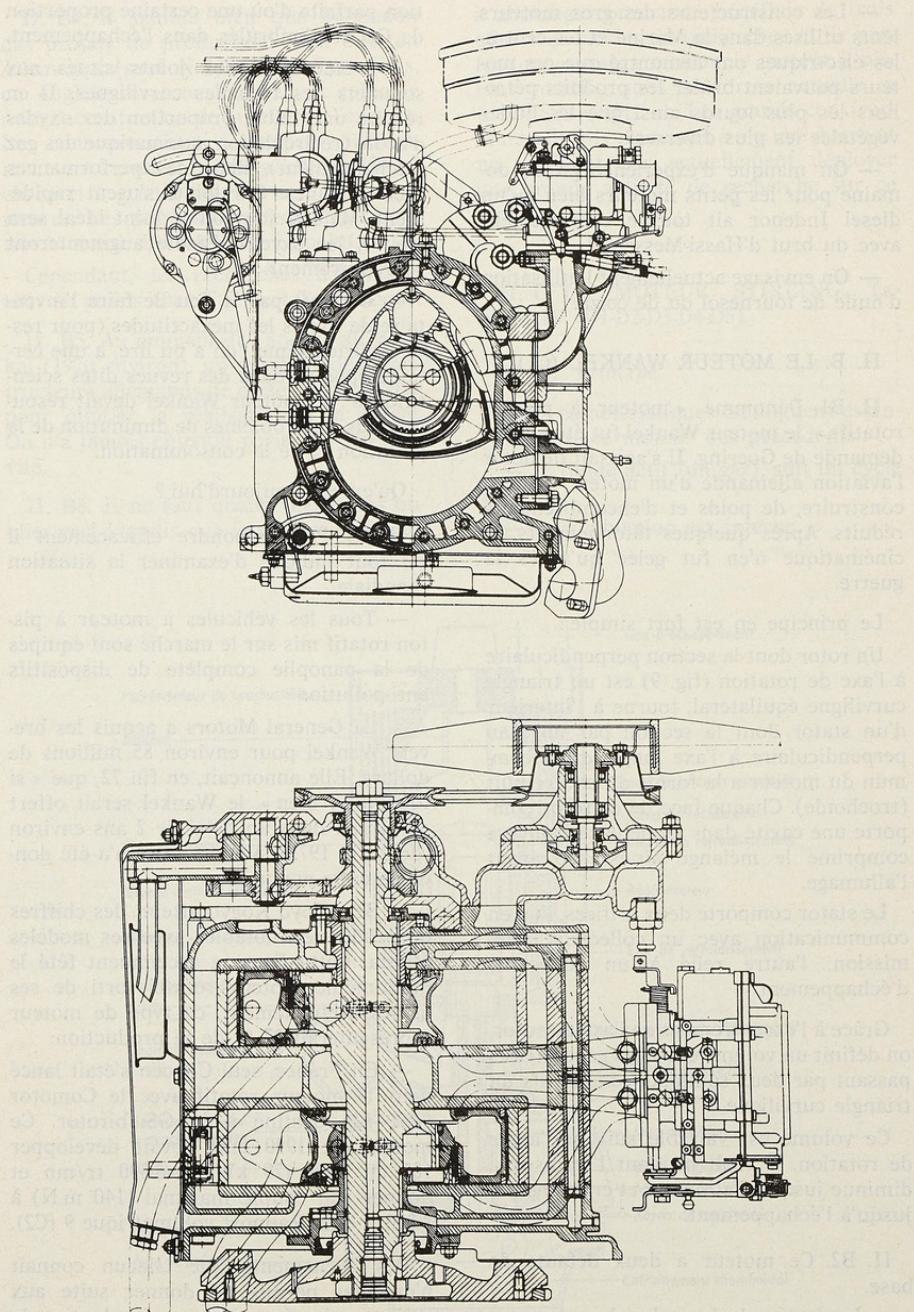


Fig. 9. — Moteur Wankel Birotor.

— Les constructeurs des gros moteurs lents utilisés dans la Marine et les centrales électriques ont démontré que ces moteurs pouvaient brûler les produits pétroliers les plus lourds ainsi que les huiles végétales les plus diverses.

— On manque d'expérience en ce domaine pour les petits moteurs bien qu'un diesel Indenor ait tourné correctement avec du brut d'Hassi-Messaoud.

— On envisage actuellement l'utilisation d'huile de tournesol ou de colza.

II. B. LE MOTEUR WANKEL (C1).

II. B1. Dénommé « moteur à pistons rotatifs », le moteur Wankel fut étudié à la demande de Goering. Il s'agissait de doter l'aviation allemande d'un moteur facile à construire, de poids et d'encombrements réduits. Après quelques tâtonnements, la cinématique n'en fut gelée qu'après la guerre.

Le principe en est fort simple :

Un rotor dont la section perpendiculaire à l'axe de rotation (fig. 9) est un triangle curviligne équilatéral, tourne à l'intérieur d'un stator dont la section par un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal commun du moteur a la forme du chiffre huit (trochoïde). Chaque face de ce rotor comporte une cavité dans laquelle se trouvera comprimé le mélange air-essence avant l'allumage.

Le stator comporte deux orifices, l'un en communication avec un collecteur d'admission, l'autre relié à un collecteur d'échappement.

Grâce à l'excentrement de l'axe du rotor, on définit un volume entre les génératrices passant par deux sommets consécutifs du triangle curviligne.

Ce volume est variable suivant l'angle de rotation. Il croît pendant l'admission, diminue jusqu'à l'allumage et croît ensuite jusqu'à l'échappement.

II. B2. Ce moteur a deux défauts de base.

— La forme de la « chambre de combustion » qui ne permet pas une combus-

tion parfaite d'où une certaine proportion de CO et d'imbrûlés dans l'échappement.

— L'étanchéité des joints situés aux sommets des triangles curvilignes. Il en résulte une faible proportion des oxydes d'azote (recirculation automatique des gaz d'échappement), mais des performances moins bonnes. Ces joints s'usent rapidement. Mais le jour où le joint idéal sera trouvé, les oxydes d'azote augmenteront corrélativement.

— Ce n'est pas le lieu de faire l'inventaire de toutes les inexactitudes (pour rester courtois) que l'on a pu lire, à une certaine époque, dans des revues dites scientifiques : le moteur Wankel devait résoudre tous les problèmes de diminution de la pollution et de la consommation.

Qu'en est-il aujourd'hui ?

II. B3. Pour répondre efficacement il est tout indiqué d'examiner la situation mondiale.

— Tous les véhicules à moteur à piston rotatif mis sur le marché sont équipés de la panoplie complète de dispositifs anti-pollution.

— La General Motors a acquis les brevets Wankel pour environ 85 millions de dollars. Elle annonçait, en fin 72, que « si tout allait bien », le Wankel serait offert en option dans un délai de 2 ans environ (donc fin 1975). Aucune suite n'a été donnée à cette annonce.

— Seul Toyo Kogyo atteint des chiffres de production notables avec ses modèles Mazda. Cette firme a récemment fêté le millionième moteur rotatif sorti de ses usines. Actuellement, ce type de moteur représenterait 27 % de sa production.

— En France, seul Citroën s'était lancé dans le moteur rotatif avec le Comotor type 624 destiné à la GS birotor. Ce moteur de 1990 cm³ devait développer 107 ch DIN (79 kW) à 6.500 tr/mn et donner son couple maximal (140 m.N) à 3 000 tr/mn. Rapport volumétrique 9 (C2).

Des événements que chacun connaît n'ont pas permis de donner suite aux projets qui prévoyaient une production de 6 000 unités par jour.

II. B4. Il semble bien que l'abandon des projets de production aussi bien en Allemagne (sauf N.S.U.), aux Etats-Unis, en Angleterre et en France, ait coïncidé avec l'accentuation de la crise de l'énergie. Les consommations descendent difficilement en dessous de 340 g/kW/h (250 g/ch/h) et à grande vitesse sont très supérieures. Les publications techniques sont très souvent discrètes sur ce point.

Cependant, les recherches continuent tout au moins chez N.S.U. et Toyo Kogyo.

II. B5. Au moment de l'apogée du Wankel (1970 environ), un syndicat des constructeurs allemands de diesel s'était formé pour étudier la réalisation d'un Diesel. On n'a jamais entendu parler de son activité.

II. B6. Il ne faut quand même pas oublier ceci : tandis que le moteur classique

à allumage commandé bénéficie de trois quarts de siècles de recherches et de perfectionnements continus, le moteur à pistons rotatifs, sous sa forme actuelle, a tout juste vingt ans. Les grands constructeurs ont mis du temps à s'y intéresser et ne semblent pas actuellement déployer une grande activité de recherche sur ce moteur.

II. C. LE MOTEUR STIRLING. Tableau IV (D1-D2-D3-D4-D5).

II. C1. Principe.

Deux caractéristiques distinguent essentiellement ce moteur des précédents :

- le fluide actif (un gaz), suit un cycle fermé ;
- la combustion est externe.

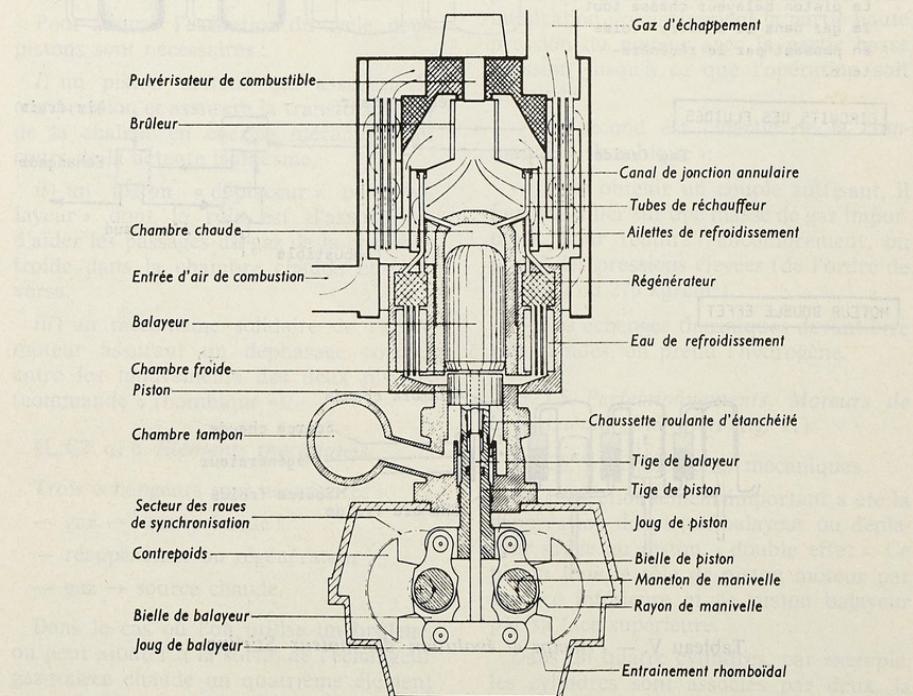


Fig. 10

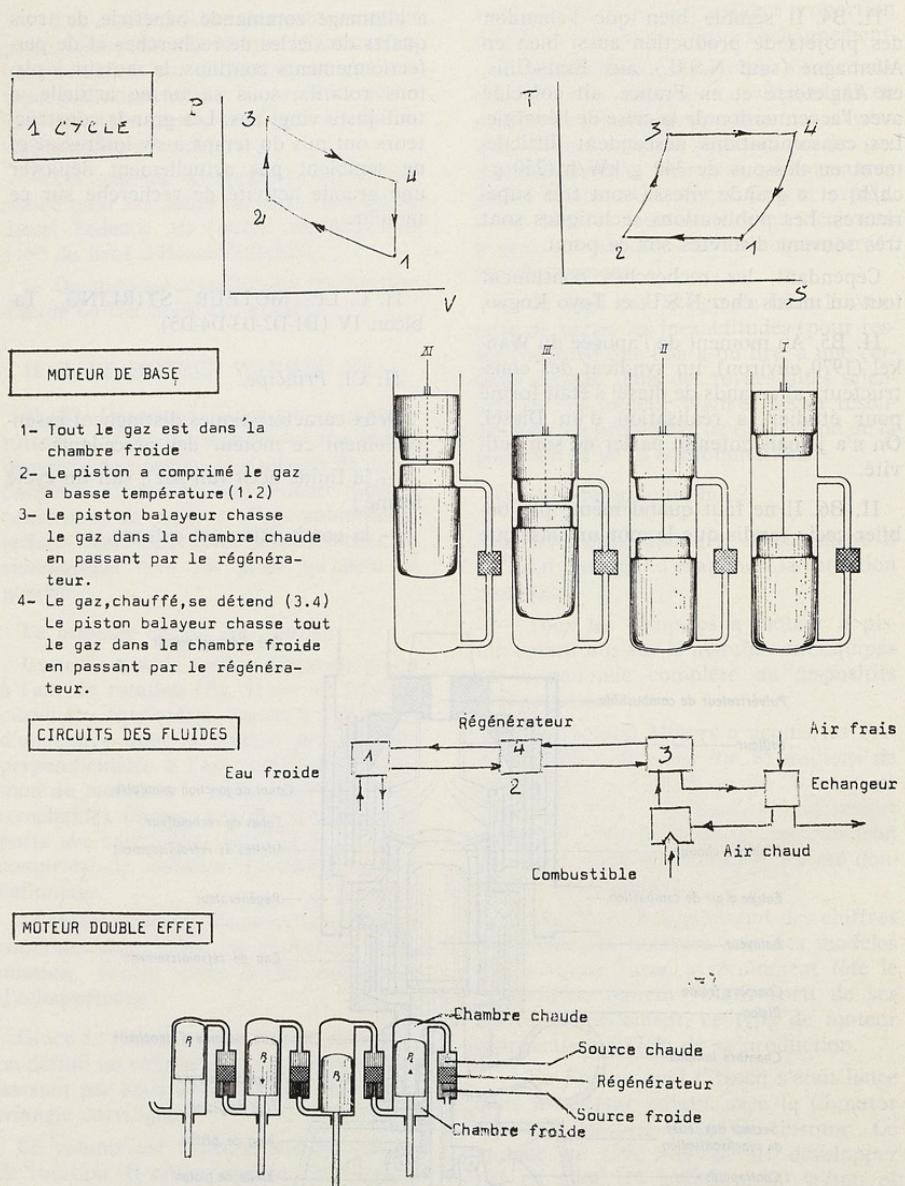


Tableau V. — Principe et évolution du moteur Stirling.

Le cycle comporte les quatre phases suivantes (tableau V) :

1-2 : Compression isotherme. La chaleur dégagée est transmise à la source froide par un premier échangeur ;

2-3 : Transfert isochore. Le fluide actif traverse un récupérateur ou régénérateur où il reçoit de la chaleur emmagasinée pendant la phase 4-1, ci-dessous ;

3-4 : Détonne isotherme. La source chaude cède des calories au fluide actif par l'intermédiaire d'un second échangeur ;

4-1 : Transfert isochore. Le retour à l'état initial se fait avec cession de chaleur dans le régénérateur.

II. C2. Réalisation.

II. C2. a) Moteur de base (fig. 10).

II. C2. a) a. Eléments mécaniques.

Pour assurer l'exécution du cycle, deux pistons sont nécessaires :

i) un piston moteur qui assurera la compression et assurera la transformation de la chaleur en énergie mécanique au cours de la détente isotherme,

ii) un piston « déplaceur » ou « balayeur » dont le rôle est d'assurer et d'aider les passages du gaz de la chambre froide dans la chambre chaude et vice-versa,

iii) un mécanisme solidaire de l'arbre moteur assurant un déphasage correct entre les mouvements des deux pistons (commande « rhombique »).

II. C2. a) b. Eléments thermiques.

Trois échangeurs sont nécessaires :

- gaz → source froide ;
- récupérateur ou régénérateur ;
- gaz → source chaude.

Dans le cas où l'on utilise un brûleur, on peut ajouter à la sortie de l'échangeur gaz-source chaude un quatrième élément augmentant la température de l'air de l'admission.

II. C3. Avantages.

— L'action sur la combustion est moins critique que dans un moteur à combustion interne. Cela peut être intéressant pour la pollution, notamment en ce qui concerne les oxydes d'azote (température de combustion plus basse).

— Le choix du combustible offre de grandes latitudes. A la limite, on peut brûler du bois ou du charbon ou utiliser un fluide caloporteur.

II. C4. Inconvénients.

— Le premier tient au principe même :

- on ne peut faire varier le couple qu'en agissant sur la masse de gaz ;
- pour l'augmenter on introduit une quantité supplémentaire prélevée dans un réservoir auxiliaire ;
- pour le diminuer, on laissera échapper du gaz qu'un compresseur auxiliaire retournera au réservoir. Comme le pompage prend quelques secondes, on met en communication provisoirement la partie haute pression du moteur avec la partie basse pression jusqu'à ce que l'opération soit terminée.

— Le second est l'inertie de la commande « rhombique ».

— Pour obtenir un couple suffisant, il faut travailler sur une masse de gaz importante. Pour réduire l'encombrement, on prend des pressions élevées (de l'ordre de 25 M Pa ou 270 kg/cm³).

— Les échanges thermiques devant être très rapides, on prend l'hydrogène.

II. C5. Perfectionnements. Moteurs de la deuxième génération (fig. 11).

II. C5. a) a. Eléments mécaniques.

Un perfectionnement important a été la suppression du piston balayeur ou déplaceur grâce au piston « double effet ». Ce piston joue le rôle de piston moteur par sa face inférieure et de piston balayeur par sa face supérieure.

Dans un quatre cylindres, par exemple, les cylindres sont associés par deux, la partie chaude de l'un étant reliée à la partie froide de l'autre.

Le mécanisme de commande « rhombique » a été remplacé :

- soit par un plateau oscillant (Ford) ;
- soit un système bielle-manivelle avec crosse classique (United Stirling Sweden).

Dans le premier moteur, les quatre cylindres sont disposés parallèlement à l'arbre moteur, en couronne.

Le second moteur a adopté la formule en Vé.

II. C5. a) b. Eléments thermiques.

Les quatre volumes de la source chaude parcourus par les gaz de combustion ont été réunis en un seul.

II. C6. Adaptation sur voiture.

Une première adaptation faite sur un car a montré que le moteur Stirling pouvait convenir à la propulsion d'un véhicule. Il s'agissait du type 4.235.

L'adaptation du modèle 4.215 DA sur Ford Torino modèle 75 a montré que (tableau VI) :

- l'implantation ne causait aucune difficulté majeure ;
- le moteur se mariait très bien avec un boîte de vitesses automatique américaine classique.

FORD / PHILIPS STIRLING ENGINE

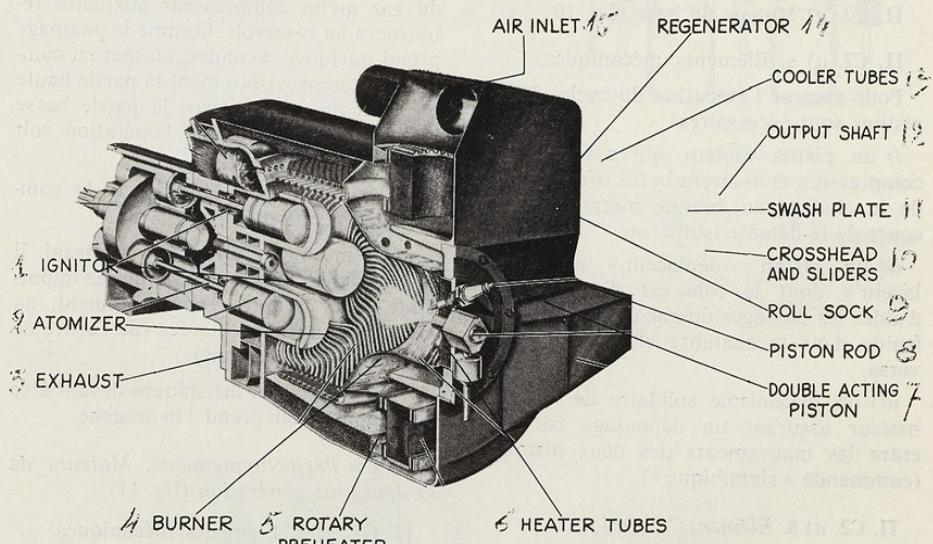


Fig. 11. — Moteur Stirling/Ford/Philips
(Deuxième Génération)

1. Bougie d'allumage,
2. Pulvérisateur,
3. Evacuation gaz brûlés,
4. Brûleur,
5. Préchauffeur rotatif,
6. Source chaude,
7. Piston « double effet »,
8. Tige de piston,
9. Joint déformable,
10. Crosse et glissières,
11. Plateau oscillant,
12. Arbre moteur,
13. Source froide,
14. Régénérateur/Récupérateur,
15. Entrée d'air.

Tableau VI. — *Historique du moteur Stirling.*

A. MOTEUR.

1816 : Robert Stirling, Ministre de l'Eglise d'Ecosse, invente le premier moteur à cycle fermé à régénérateur.

Plus tard, John Ericsson, suédois travaillant en Grande-Bretagne, invente le moteur à cycle ouvert et régénérateur.

1853 : Ericsson construit un moteur marin pour le « Ericsson », 300 CV., 9 tr/mn, 4 cylindres. Alésage 4,62 m. Course 1,65 m.

1914 : Apparition, dans l'intervalle, du moteur à gaz, du moteur à allumage commandé, puis du diesel. Vulgarisation du moteur électrique. La production tombe.

1946 : Derniers modèles en Angleterre.

**

1930 : Philips reprend un projet, initialement un petit groupe électrogène pour émetteurs-récepteurs radio-militaires. But : un moteur de 330 kW.

1958-1970 : Collaboration avec General Motors.

1970 : Licences à M.A.N., M.W.M., U.S.S. (United Stirling, Suède).

1972 : Licence exclusive valable dans le monde entier pour moteurs destinés à des engins mobiles, moteurs marins compris, accordée à Ford. Accord de développement.

1974 : United Stirling remet à Ford une Ford Pinto équipée de son V4 Stirling.

1976 : Ford annonce la possibilité d'installer un moteur Stirling à bord d'une Ford Torino. Annonce également qu'il faudra 10 ans pour l'industrialisation.

**

MACHINE FRIGORIFIQUE.

1834 : John Herschel voit la possibilité.

1876 : Alexandre Kirk décrit une machine utilisée pendant 10 ans.

1940 : Philips attaque le problème commercial.

1955 : Machine de liquéfaction de l'air.

Miniaturisation : Malakar Labs Inc. : Hughes Aircraft (U.S.A.).

North American Philips : Supraconductivité sert d'axe de recherche.

mais :

— qu'il fallait un radiateur deux fois et demi plus gros que celui de la voiture équipée du moteur à allumage commandé ;

— que pour passer les normes américaines pollution 80 et au-delà, un système très précis du dosage air-combustible était indispensable.

II. D. LE MOTEUR ELECTRIQUE (E1-E2-E3).

On ne peut parler du moteur électrique sans prendre en considération la source

d'électricité qui l'alimentera. Deux types de générateurs sont possibles :

- les piles ou générateurs primaires,
- les accumulateurs ou générateurs secondaires.

II. D1. a) Les piles peuvent être utilisées de deux manières :

- ou bien on les jette une fois qu'elles ne produisent plus d'électricité ;
- ou bien on remplace l'un des produits, électrodes ou l'électrolyte.

Les lancements d'engins aéro-spaciaux avaient attiré l'attention sur les piles

Tableau VII. — Caractéristiques de deux moteurs Stirling destinés à la traction automobile.

Désignation	Type	
	4-235	4-215.DA (*)
Nombre de cylindres	4	4
Système de combustion	Directe	Directe
Alesage × Course mm	77,5 × 49,8	73 × 52
Cylindrée totale cm ³	940	863
Fluide actif	Hélium	Hydrogène
Puissance maxi. kW	147	127
A tr/mn	3.000	4.000
Sous pression de MPa	22	20
Puissance kW	73,6	—
A tr/mn	3.000	—
Sous pression de MPa	11	—
Température source chaude °C	700	750
Température radiateur °C	60	64
Couple maxi m.N	350	428
A tr/mn	1.000	1.350
Rendement A 73,6 kW	30 %	—
A 127 kW	—	32 %
Graissage	Carter sec	Carter sec
Masse à l'état sec kg	760	448

(*) Moteur 2^e génération. Performances au banc.

hydrogène-oxygène connues dès les origines de l'électrochimie (début du XVIII^e siècle). L'originalité de la solution aérospatiale résidait dans le stockage sous forme liquide des deux gaz. Mais il fallait régulariser l'évaporation de l'hydrogène liquide. La mise hors service d'une petite résistance chargée de cette opération a bien failli faire avorter le retour des cosmonautes qui ont été très heureux d'avoir des accumulateurs au plomb comme batterie de secours.

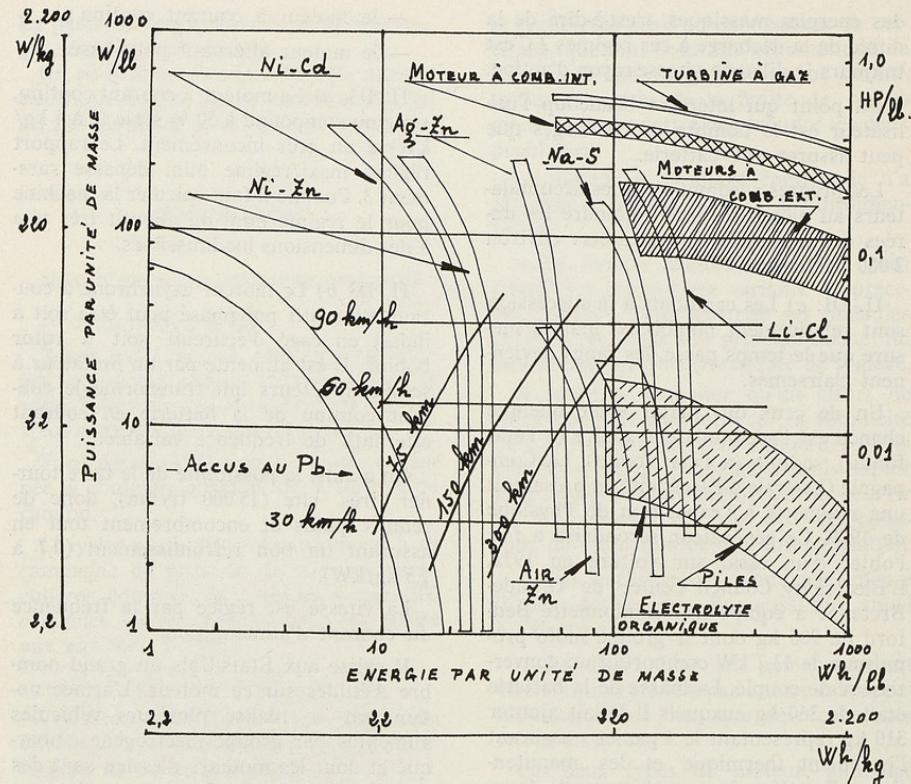
A la même époque, la General Motors a réalisé une camionnette alimentée de cette manière. Il n'y avait pratiquement pas de place pour les marchandises. L'électrolyte était une solution de potasse normale. L'échauffement était tel qu'il fallait prévoir une circulation et un radiateur spécial. La résistance intérieure de ces éléments était si forte que, dans une rampe, la tension était insuffisante pour actionner l'équipement classique (clignotants, feux, etc...), dont les circuits ont dû être munis de survoltateurs ! On a accusé la G.M. d'avoir donné « the kiss of the death » à la traction électrique. Et pourtant elle avait

joué le jeu. On a alors proposé la pile méthanol-air. A la température ambiante la combustion du méthanol exige un catalyseur. On n'en a pas encore trouvé un bon marché. De plus, la tension aux bornes est d'environ 0,3 V à vide et baisse très vite quand l'intensité débitée croît. Il faut donc un nombre important d'éléments si l'on veut un équipement électrique léger. Ce genre de pile ne donne pas plus de 20 W/kg pour un prix de 900 à 1.200 F/kW. L'encombrement est du même ordre que celui des batteries d'accumulateurs classiques au plomb ou au cadmium-nickel.

II. D1. b) Les seuls accumulateurs pratiquement disponibles sont à l'heure actuelle :

- l'accumulateur au plomb (électrolyte acide sulfurique) ;
- L'accumulateur au cadmium-nickel (électrolyte potasse).

L'accumulateur argent-zinc, étant donné son prix (environ 17 fois celui de l'accumulateur au plomb) est réservé à l'équipement de bord des avions de chasse.



SOURCE: U.S. DPT OF COMMERCE

Fig. 12. — Caractéristiques énergétiques nécessaires pour la propulsion d'un véhicule de 910 kg, équipé d'un propulseur de 230 kg en marche continue.

La figure 12 donne les puissances massiques en fonction des énergies massiques pour les différents types de générateurs primaires et surtout secondaires. On a rappelé les caractéristiques des turbines à gaz et des moteurs à combustion interne ou externe. Il s'agit évidemment de valeurs moyennes.

Sur le même graphique on a porté des lignes horizontales correspondant aux vitesses de 30, 60 et 90 km/h. De même des courbes correspondant aux rayons d'action de 75, 150 et 300 km ont été tracées. L'intersection d'une de ces courbes avec une droite « de vitesse » donne le rayon d'action possible à cette vitesse.

On voit que pour le cas envisagé (véhicule 910 kg + propulseur 230 kg) l'accumulateur au plomb ne permettrait pas beaucoup plus de 100 km à 40 km/h.

Et l'on touche ici à la véritable escroquerie morale de nombreux communiqués. *On annonce un rayon d'action maximal et une vitesse maximale sans prévenir qu'il n'y a aucune relation entre les deux.* Le rayon d'action maximal ne sera jamais atteint avec la vitesse maximale annoncée !

Depuis 1973, on parle de nouveaux modèles d'accumulateurs cadmium-nickel pouvant donner des puissances spécifiques de 350 et même 775 W/kg. Mais quid

des énergies massiques, c'est-à-dire de la durée de la décharge à ces régimes ? C'est toujours le dilemne vitesse-rayon d'action.

Un point qui intéresse beaucoup l'utilisateur est le nombre de décharges que peut assurer une batterie.

Les progrès accomplis par les accumulateurs au plomb les font rejoindre les durées des accumulateurs alcalins : environ 2 000 décharges.

II. D1. c) Les candidats à la succession sont relativement nombreux, mais à mesure que le temps passe, les rangs deviennent clairsemés.

Un de ceux qui paraît avoir quelque chance est l'accumulateur soufre (à l'état fondu), sodium (à l'état fondu). La Compagnie Générale d'Electricité en présentait une maquette à l'exposition de Physique de 1979. Ce générateur secondaire a fait l'objet d'un essai sur voiture en 1972. L'Electricity Council Center de Grande-Bretagne a équipé une camionnette Bedford de 900 kg dont le groupe moto propulseur de 13,2 kW comportait un convertisseur de couple. La masse de la batterie était de 360 kg auxquels il fallait ajouter 310 kg représentant le « panier » assurant l'isolement thermique et les manutentions. En effet, la température de fonctionnement est comprise entre 250 et 350 °C. La vitesse atteinte a été de 80 km/h, mais on ne parle pas de rayon d'action.

Les résultats permettent d'envisager des batteries de 7,7 kg/kWh et d'un encombrement de 0,0085 m³/kWh, « panier » compris (30 % du poids total).

II. D2. Lorsque l'on parle de traction électrique, il ne faut pas oublier le poste de charge. Ses caractéristiques doivent être adaptées au type d'accumulateur et au service qu'on en attend. Notamment dans le cas de l'accumulateur au plomb, si l'on prévoit une recharge partielle sous forte intensité (biberonage), l'intensité doit être réduite au moins au dixième de la capacité dès que la tension aux bornes par élément atteint 2,40 volts.

II. D3. Les moteurs dont on dispose sont :

- le moteur à courant continu ;
 - le moteur alternatif polyphasé.

II. D3. a) Le moteur à courant continu, série ou compound à 50 % série (2 à 4 kg/kW) a un gros inconvénient. Le rapport régime maxi/régime mini dépasse rarement 3. Comme il faut calculer la machine pour le régime mini on aboutit très vite à des dimensions inadmissibles.

II. D3 b) Le moteur asynchrone à courant alternatif polyphasé peut être soit à induit en cage d'écureuil soit à rotor bobiné. Il est alimenté par un mutateur à semi-conducteurs qui transforme le courant continu de la batterie en courant alternatif de fréquence variable.

On a ainsi la possibilité de le faire tourner très vite (15 000 tr/mn), donc de réduire poids et encombrement tout en assurant un bon refroidissement (0,7 à 1,5 kg/kW).

La vitesse est réglée par la fréquence du courant d'alimentation.

Il existe aux Etats-Unis un grand nombre d'études sur ce moteur. L'armée notamment a réalisé plusieurs véhicules alimentés par groupe électrogène embarqué et dont les moteurs d'essieu sont des moteurs polyphasés. On trouvera de nombreux détails dans la référence (E 1).

L'emploi de ce moteur pose la question du réducteur. Avec une démultiplication de 1/3 la vitesse maximale de 15 000 tr/mn tombe à 5 000 parfaitement compatible avec la mécanique automobile normale. Un simple train planétaire suffit.

On peut se demander pourquoi les électriques ont si peur des engrenages. Dans une rampe, un moteur série tourne lentement et absorbe une forte intensité. Plus il s'échauffe et moins sa ventilation est efficace. Une solution, adoptée en grande traction, serait de souffler de l'air frais à l'aide d'un ventilateur auxiliaire. Mais cette machine absorbe de la puissance sur la batterie.

Une boîte à deux vitesses, commandée par un relais d'intensité, permettrait de faire tourner le moteur plus vite, donc de mieux le ventiler et de mieux le refroidir.

La perte d'énergie avec de bons engrenages serait à peine de 1 %.

On peut donc dire que du côté moteur électrique il n'y a pas de problème. Il n'en est pas de même pour l'accumulateur.

CONCLUSION

Nous n'avons pas volontairement parlé :

— *de la turbine à gaz.*

Rover avait réalisé plusieurs prototypes qui n'ont jamais débouché sur la série. Il semble que les difficultés rencontrées aient été dues aux échangeurs.

Ford depuis 1972 remet d'année en année la commercialisation de la turbine de camion.

Chrysler a mis fin prématurément à sa campagne de présérie de voitures particulières équipées de turbines à gaz. 500 véhicules étaient prévus, on s'est arrêté aux environs de 300 ;

— *de la solution « hybride ».*

Cette solution associe à une propulsion électrique à accumulateurs un groupe électrogène de petite puissance.

A l'origine, il s'agissait de réduire les émissions de polluants en site urbain en n'utilisant que la traction électrique. Le moteur thermique servant « extra-muros ». Si nécessaire la batterie pouvait donner assistance dans les rampes, à condition d'avoir encore de l'énergie en réserve.

Par la suite on a cru pouvoir augmenter le rayon d'action, mais le succès de l'opération dépend avant tout du parcours.

Restent donc disponible immédiatement :

— Le moteur à allumage commandé, de plus en plus compliqué du point de vue électronique.

Tout ce que l'on avait dû faire jusqu'ici pour réduire l'émission de polluants a entraîné un léger accroissement de la consommation.

L'injection contrôlée électroniquement

et complétée par l'automatisation de certaines fonctions (contrôle automatique de l'avance à l'allumage permettant de travailler très près de la limite de cognement) doit permettre de résoudre les deux problèmes.

Le moteur à allumage commandé n'a pas encore joué la carte de la suralimentation.

— Le moteur Wankel, que l'on peut considérer comme une variante du précédent semble avoir maîtrisé ses maladies de jeunesse. Mais son principe même, lui enlève une certaine possibilité de réglage.

Il serait à souhaiter qu'un effort de recherche soit poursuivi car la simplicité de construction (la rectification des « trochoïdes » est un problème résolu depuis longtemps) devrait permettre de couvrir les suppléments de prix de l'anti-pollution, de l'injection et de l'automatisation.

— Les carburateurs n'ont pas encore dit leur dernier mot. Eux aussi font appel à l'électronique.

— Le diesel, bien au point, pouvant être suralimenté, n'a pas encore fait appel à l'électronique bien que des recherches soient en cours.

Ces deux types de moteur, allumage commandé et diesel acceptent un grand nombre de combustibles, liquides ou gazeux, autres que les hydrocarbures. Mais il faut les adapter et surtout, prévoir en temps utile la production de ces combustibles de remplacement.

Les autres solutions sont :

— Le moteur Stirling, dont le gros avantage est de faire appel à la combustion externe mais qui doit quand même s'équiper de systèmes automatiques de dosage de combustible.

Ses handicaps sont le gros volume du radiateur et son coût de fabrication.

— La traction électrique attend toujours la pile ou l'accumulateur « miracle » et reste du domaine du porte à porte.

Les dix années qui viennent verront donc se poursuivre le développement des deux moteurs actuellement les plus répandus : à allumage commandé et diesel.

Il faut souhaiter que l'abus des réglementations ne conduise pas à en augmenter le prix de manière abusive et qu'une politique clairvoyante des carburants et combustibles évite de mettre les usagers en « panne sèche ».

Pétroliers et Motoristes ont jusqu'ici pu venir à bout des problèmes posés par des situations souvent imprévisibles. Leur fraternelle collaboration permet de bien augurer de l'avenir. « God willing » comme disent les Britanniques.

Bibliographie

A. Moteur à allumage commandé.

A1. Evolution du moteur à combustion interne dans le domaine de la voiture particulière, Marcel Dangauthier, Ingénieurs de l'Automobile, 36^e année, n° 1, janvier 1962.

A2. Note technique Robert Bosch (France S.A.), 22-09-69.

A3. Elektronische Benzineinspritzung mit Stenerung durch Luftmenge und Motortrezahl [Injection électronique d'essence, commandée en fonction du débit d'air et de la vitesse du moteur], H. Scholl, Bosch Technische Berichte, Bd 4 (1973), Heft 5, p. 190-200.

A4. Elektronische Zündanlagen für Otto-Motoren [Allumage électronique pour moteurs à allumage commandé], H. Schwartz, H. Gutberlet. ATZ, 81^e année, n° 4, avril 1979, p. 145-149.

A5. Ceramic aspects of the Bosch lambda-sensor. [Aspects céramiques de la sonde Bosch lambda], H. Dueker, K. H. Friese, W. D. Haeger. SAE Preprint 750223.

A6. Ottomotoren mit elektronischer Steuerung und Regelung [Moteurs à allumage commandé à commande et régulation électroniques], I. Geiger, C. Klarhoefer, K. Stamm. Automobil Industrie, n° 1, mars 1979, 24^e année, p. 49-57.

A7. Die Motronic von Bosch eine digitale elektronik [Le Motronic de Bosch, une électronique digitale], A. Bahr. MTZ, 40^e année, n° 9, septembre 1979, p. 406-407.

A8. Der BMW 3,2 l Motor mit digitaler Motorelektronik (Motronic) [Le moteur BMW, 3,2 l avec électronique adaptée au moteur (Motronic)], B. Plodek, F. J. Dehne. ATZ, 81^e année, n° 12, décembre 1979, p. 625-628.

B. Moteur diesel.

B1. Le diesel rapide automobile, J. Moulin. Cours du CLESIA, session 1978/1979. Société des Ingénieurs de l'Automobile.

C. Moteur Wankel.

• C1. Rotationskolben Veubrennungsmoto-

ren. [Moteurs à pistons rotatifs et à combustion], W. D. Bensinger, 1973. Edit. Springer.

C2. Citroen Wankel stars at Frankfurt show [Le wankel Citroen, vedette du salon de Francfort], D. Scott. Automotive Industries, 1^{er} décembre 1973, p. 28-32.

D. Moteur Stirling.

D1. Prospects of the Stirling engine for vehicular propulsion [Perspectives d'application du moteur Stirling à la propulsion des véhicules], R. J. Meijer. Philips Technical Review, vol. 31, n° 5/6, p. 168-185, 1970.

D2. The Stirling Engine for passenger car application [Le moteur Stirling pour voitures particulières], N. D. Postma, R. Van Giesel, F. Reinik. SAE Preprint 730648.

D3. Present state of the art of the Philips Stirling Engine [Etat actuel de la technique du moteur Stirling Philips], H. C. J. Van Beukering, H. Fokker. SAE Preprint 730646.

D4. Design of the 4.215 DA Automotive Stirling Engine [Construction et conception du moteur Stirling 4.215 DA pour automobiles], R. Van Giessel, F. Reinink. SAE Preprint 770082.

D5. Design considerations on a thermal energy storage Stirling Engine Automobile [Considérations sur un moteur Stirling d'automobile à accumulation d'énergie], G. A. Asselman, C. L. Spigt, R. J. Meijer. SAE Preprint 770080

E. Traction électrique.

E1. Le moteur asynchrone, par P. Rapin, Ingénieurs de l'Automobile, 11-68, p. 594 à 610.

E2. Die Natrium/Schwefel Batterie [La batterie sodium/soufre]. ATZ, 81^e année, n° 5, mai 1979, p. 195-196.

• E3. Brennstoffelemente [Éléments à combustible], H. V. Döhren, K. J. Euler. Vdi Verlag, 1964.

Nota. — Les références repérées par • sont des livres.

ANNEXE A1

INJECTION ELECTRONIQUE

— AVANTAGES :

- Pas de prise spéciale de mouvement sur le moteur.
- Possibilité d'introduire de très nombreuses corrections.
- Compacité.
- Possibilité d'installation n'importe où.

— INJECTION ELECTRONIQUE BOSCH :

— *Principe* : Le dosage se fait en agissant sur la durée d'ouverture de l'injecteur. Le temps initial d'ouverture est fixé par l'émission d'une impulsion. L'émetteur est incorporé dans le distributeur d'allumage. En même temps, l'impulsion met en route l'organe de calcul de la durée d'ouverture. Cet organe est commuté après fonctionnement sur un cylindre ou un groupe de cylindres.

— PARAMETRES :

- *Vitesse*. Fréquence des impulsions de déclenchement.
- *Dépression* [pression absolue dans l'admission]. Mesurée par capteur à induction raccordé par courte tubulure à la pipe d'admission.
- Repérage pleine charge. Par manocomact à dépression dans l'admission. Après passage d'un certain seuil met sur richesse maxi.
- *Suppression totale de l'alimentation en marche « pied levé »*. Par interrupteur de position monté sur le papillon. Supprime les émissions d'impulsions si, en même temps, le régime est compris entre 1 300 et 1 700 tr/mn.
- *Mise en action*. Interviennent des capteurs de température [eau, huile, culasse] constitués par des thermistances

dont les variations agissent sur la durée d'ouverture des injecteurs.

- *Correction de température d'air*. Lui correspond la correction de remplissage. Thermist.

- *Démarrage à froid*. Enrichissement commandé par interrupteur de démarrage et capteur de température.

- *Mise en action*. Arrivée supplémentaire d'air par tiroir auxiliaire.

ELECTRONIQUE

Essentiellement un *amplificateur de puissance par cylindre ou groupe de cylindres et son compte-temps*.

Chaque amplificateur de puissance est mis en route par l'*impulsion du distributeur* si son compte-temps est branché. Une liaison logique assure la liaison franche de l'ampli de puissance au déclencheur correct et élimine l'action de mauvais contacts.

Le compte-temps est un basculeur monostable mis en position instable par le déclenchement de l'impulsion. La *durée de l'instabilité* est assurée par la *self du capteur de pression absolue* d'admission. Une correction de vitesse correspondant à la caractéristique de vitesse du moteur est introduite.

Autres corrections. Variations de tension d'alimentation. Celles-ci agissent légèrement sur la durée des impulsions d'injection, d'où modification du temps d'attraction de l'électro et de la quantité injectée.

Sécurité. On ne peut mettre en route la pompe que si le démarreur est mis en action ou dépasse une vitesse limite de 100 tr/mn afin de ne pas noyer les cylindres.

Circuit imprimé : 220 éléments, 25 transistors, 35 diodes.

Pompe d'alimentation : 50 l/h, 130 kPa.

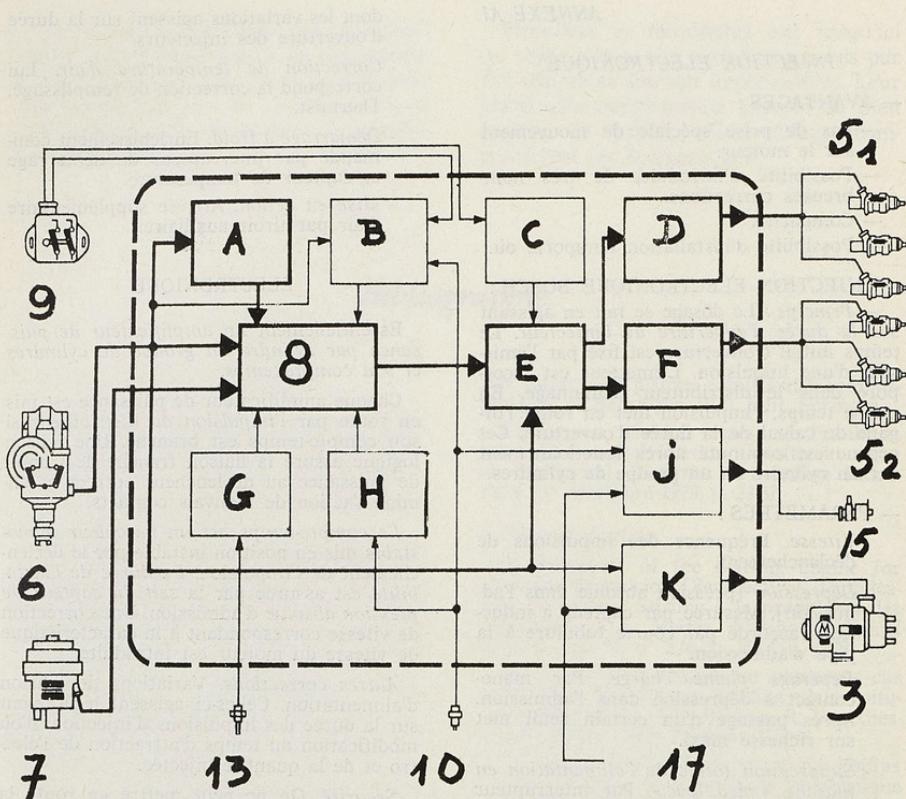


Figure A1. — Schéma de principe de l'électronique du jetronic Bosch.

- | | |
|--|---|
| 3. Pompe. | A. Correction de vitesse. |
| 5 ₁ . Injecteurs groupe 1. | B. Interrupteur « vitesse ». |
| 5 ₂ . Injecteurs groupe 2. | C. Enrichisseur pour passage de vitesses. |
| 6. Allumeur avec contacts de déclenchement. | D. Etage final groupe 1. |
| 7. Sonde de pression. | E. Logique. |
| 8. Organe de calcul. Multivibrateur. | F. Etage final groupe 2. |
| 9. Interrupteur de papillon. | G. Correction air admission. |
| 10. Sonde de température d'eau de refroidissement. | H. Enrichissement. |
| 13. Sonde de température d'air additionnel. | J. Interrupteur température. |
| 17. Vers l'interrupteur de démarreur. | K. Commande de pompe. |

MAISON DE LA
SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

ACTIVITÉS DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

IN MEMORIAM

Les Membres de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale
ont été très émus d'apprendre le décès de leur regretté

Jacques BARATTE

*Ancien Président de l'Académie d'Agriculture
Président du Comité de l'Agriculture de la Société
Officier de la Légion d'Honneur*

survenu pendant son sommeil le 13 mai 1980, dans sa 81^e année.

Ils garderont fidèlement le souvenir de leur ancien Collègue qui, pendant
de nombreuses années, voulait bien leur accorder un concours précieux.

Le Président et le Délégué Général représentaient la Société à la cérémonie religieuse célébrée, le samedi 17 mai 1980, en l'Eglise Saint-Lubin de Noisy-le-Roi.

Le Président de la Société, Directeur de la publication : J. BURÉ, D.P. n° 1080

IMPRIMERIE TARDY QUERCY (S.A.) CAHORS. — 00.217. — Dépôt légal : II-1980
Commission paritaire n° 57.497

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Fondée en 1801

Reconnue d'Utilité Publique en 1824

4, place St-Germain-des-Prés, 75006 PARIS

Tél. : 548-55-61 - C.C.P. 618-48 Paris



HISTORIQUE

La « SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE » fondée en l'AN X de LA REPUBLIQUE (1801) par NAPOLEON-BONAPARTE, Premier Consul et CHAPTAL, Ministre de l'Intérieur et premier Président de la Société, assistés de Berthollet - Brongniart - Delessert - Fourcroy - Grégoire - Laplace - Monge - Montgolfier - Parmentier... et de nombreux autres savants, ingénieurs, et hommes d'Etat,

RECONNUE D'UTILITE PUBLIQUE EN 1824,

a poursuivi son action pendant tout le XIX^e siècle, sous la présidence de Thénard - J.-B. Dumas - Becquerel et de leurs successeurs. On la voit encourager tour à tour Jacquard - Pasteur - Charles Tellier - Beau de Rochas.

Ferdinand de Lesseps - Sainte-Claire-Deville - Gramme - d'Arsonval furent titulaires de sa Grande Médaille.

BUT

LA SOCIETE S'EST PRÉOCCUPÉE PARTICULIÈREMENT, CES DERNIÈRES ANNÉES, DE DONNER AUX MILIEUX INDUSTRIELS DES INFORMATIONS EXACTES LEUR PERMETTANT DE SUIVRE LES DERNIERS DÉVELOPPEMENTS DE L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.

ACTIVITÉS

ELLE DECERNE DES PRIX ET MÉDAILLES aux auteurs des inventions les plus remarquables et des progrès les plus utiles ainsi qu'aux ouvriers et contremaîtres qui se sont distingués par leur conduite et leur travail. Elle organise des CONFÉRENCES d'actualité scientifique, technique et économique.

Elle publie une REVUE TRIMESTRIELLE : « L'INDUSTRIE NATIONALE ».

RECRUTEMENT

La Société recrute, en fait, ses Membres (Sociétés ou Individus) parmi ses anciens Conférenciers ou Lauréats. Ils ne sont soumis à aucune obligation particulière en dehors du paiement d'une cotisation annuelle de QUARANTE FRANCS pour les Personnes ou de CENT CINQUANTE FRANCS pour les Sociétés.

