

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](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

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

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

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

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

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

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	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
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	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
	1980, n° 1
	1982, n° spécial

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

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1976, n° 2
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1976

Collation	1 vol. (40 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	44
Cote	INDNAT (115)
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.115

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 reportera 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 abordant, 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, publiant 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 Emptoz, [« 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 EMPTOZ, [« 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

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
1976 - N° 2

• •

N° 2 - 1976

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Réduction de la pollution atmosphérique, due à l'automobile et économie d'énergie,

par B. SALÉ, p. 3

- Quelques applications récentes de l'utilisation du froid,

par M. ANQUEZ, p. 20

Annonce Assemblée Générale du C.I.R.P.

Publication sous la direction de M. Henri NORMANT

Membre de l'Institut, Président

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° : 20,00 F

C.C.P. Paris, n° 618-48

Réduction de la pollution atmosphérique due à l'automobile et économie d'énergie ⁽¹⁾

par Bernard SALER

Directeur de la Division Applications
à l'Institut Français du Pétrole

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

RÉSUMÉ

L'effort engagé dans les pays industrialisés pour réduire la pollution atmosphérique doit maintenant tenir compte plus encore que par le passé, de la nécessité imposée par la conjonction d'échouement l'énergie. L'exposé est consacré à l'étude de la complémentarité de ces deux aspects ou ce qui concerne l'automobile. L'ensemble des actions antipolluantes ou antipollution ne portent pas sur le générateur d'énergie émis par le domaine de compétence relevant, par conséquent, la réduction des émissions de polluants nécessite des modifications plus ou moins profondes du moteur dont certains peuvent poser des problèmes de point de vue de l'économie d'énergie. Dans le but de préciser la nature de ces problèmes, les techniques antipollution correspondant à différents niveaux de limitation des émissions sont examinées du point de vue de leur coût, de leur incidence sur la consommation de carburant et de leur interaction avec les problèmes relatifs à l'économie d'énergie. Sont ainsi exposés et revus les moyens de réduction des émissions liées à une amélioration de la combustion, les procédés de post-

combustion, le problème de la réduction de la teneur en plomb des carburants.

Cette analyse montre que dans une large mesure la réduction des émissions de polluants et la diminution de la consommation sont des objectifs complémentaires, mais que la difficulté des problèmes à résoudre est que les techniques antipolluantes entraînent d'effet négatif sur la consommation d'énergie et/ou une augmentation de la consommation de ces derniers. L'exposé conclut à l'absence de certitude technique dans le domaine des travaux devant être poursuivis pour parvenir à la fois à réduire encore de façon substantielle les émissions de polluants et à améliorer le rendement des moteurs.

INTRODUCTION

Dans tous les pays industrialisés la réduction de la pollution atmosphérique est devenue un objectif prioritaire au cours des dernières années. Mais

(1) Conférence faite le 12 février 1977 à la Société Française pour l'Énergie et l'Automobile.

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Réduction de la pollution atmosphérique due à l'automobile et économie d'énergie (*)

par Bernard SALÉ

Directeur de la Division Applications
à l'Institut Français du Pétrole

RESUME

L'action engagée dans les pays industriels pour réduire la pollution atmosphérique doit maintenant tenir compte, plus encore que par le passé, de la nécessité, imposée par la conjoncture, d'économiser l'énergie. L'exposé est consacré à l'étude de la comptabilité de ces deux objectifs en ce qui concerne l'automobile. L'ensemble des actions antigaspillage ou antipollution ne portant pas sur le générateur d'énergie constitue un domaine de comptabilité évident. En revanche, la réduction des émissions de polluants nécessite des modifications plus ou moins profondes du moteur dont certaines peuvent poser des problèmes du point de vue de l'économie d'énergie. Dans le but de préciser la nature de ces problèmes, les techniques antipollution correspondant à différents niveaux de limitation des émissions sont examinées du point de vue de leur coût, de leur incidence sur la consommation de carburant et de leur interaction avec les procédés visant à l'économie d'énergie. Sont ainsi passés en revue les moyens de réduction des émissions basés sur une amélioration de la combustion, les procédés de post-

combustion, le problème de la réduction de la teneur en plomb des essences.

Cette analyse montre que dans une large mesure la réduction des émissions de polluants et la diminution de la consommation sont des objectifs compatibles, mais que la difficulté des problèmes à résoudre pour que les mesures antipollution n'aient pas d'effet négatif au plan de l'économie d'énergie croît très rapidement avec la sévérité de ces mesures au-delà d'un certain niveau. L'effort de recherche entrepris dans le monde sur ce thème devrait progressivement permettre à la fois de réduire encore de façon substantielle les émissions de polluants et d'améliorer le rendement des moteurs.

INTRODUCTION

Dans tous les pays industriels la réduction de la pollution atmosphérique est devenue un objectif prioritaire au cours des quinze dernières années. Mais

(*) Conférence faite le 19 février 1976 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

depuis la crise pétrolière de 1973 l'économie d'énergie est apparue comme une nécessité non moins impérieuse. Le but de cet exposé est d'examiner dans quelle mesure les deux objectifs sont compatibles en ce qui concerne la pollution due à l'automobile. Il est évident qu'il n'y a guère de problème de compatibilité pour l'ensemble des mesures ne portant que sur le véhicule ou l'utilisation du véhicule et non directement sur le générateur d'énergie. C'est ainsi, par exemple, que la réduction du poids des voitures, le développement des transports en commun, la mise en place de voies de dégagement, la création de zones piétonnes, etc. sont aussi bien des moyens de lutte contre la pollution que des moyens d'économiser l'énergie.

Mais il peut en aller autrement des actions concernant le générateur d'énergie telles que les normes qui limitent les émissions de polluants. Il est permis de penser à priori que là aussi existe une certaine zone de compatibilité : les imbrûlés présents dans l'échappement contiennent de l'énergie non utilisée et le fait d'en éviter la formation grâce à une combustion complète permet la récupération de cette énergie perdue et un certain gain de rendement. Mais il est évident que cette récupération devient négligeable à partir d'un certain niveau d'épuration alors qu'il n'est pas exclu que les moyens techniques à mettre en œuvre pour atteindre ce résultat aient un effet défavorable sur la consommation. Par ailleurs certains polluants comme les oxydes d'azote n'ont qu'un contenu énergétique négligeable. Il y a donc lieu d'examiner jusqu'à quel point la réduction des émissions peut être rendue compatible avec l'économie d'énergie et c'est sur ce problème particulier que sera localisé l'exposé.

A cet effet nous allons passer en revue — nécessairement très rapidement — les principales classes de solutions antipollution en nous attachant à rapprocher leur efficacité de leur coût et de leur effet sur la consommation d'énergie.

I. — REGLEMENTATION DES EMISSIONS

Pour caractériser l'efficacité des solutions antipollution le plus simple est de se référer aux normes d'émission en vigueur ou envisagées qu'elles permettent de satisfaire.

Les principaux polluants émis par les véhicules et qui font l'objet de mesures réglementaires sont l'oxyde de carbone (CO), les hydrocarbures imbrûlés (HC) qui recouvrent un ensemble très complexe de composés chimiques, les oxydes d'azote (NO_x) et les composés du plomb provenant de l'additif antidétonant, les alkyles de plomb (plomb tétraéthyle et plomb tétraméthyle) employés pour améliorer l'indice d'octane des essences.

Pour repérer le niveau de polluants émis par un véhicule, comme ces émissions varient beaucoup avec les conditions de fonctionnement, on utilise un cycle de conduite normalisé correspondant à un parcours urbain type et comprenant des phases de ralenti, d'accélération, de palier et de décélération parfaitement définies. On recueille et analyse les gaz d'échappement émis pendant ce cycle. Le cycle de conduite européen (1) diffère très notablement du cycle adopté aux Etats-Unis (2), ce qui est justifié par le fait que les conditions d'utilisation des véhicules ne sont pas les mêmes, et cette différence limite les comparaisons de niveaux de sévérité à des considérations d'ordre de grandeur (3).

Les polluants pris en considération pour l'instant en Europe et notamment en France sont l'oxyde de carbone et les hydrocarbures imbrûlés. Les oxydes d'azote ne font pas encore l'objet de réglementation. La réglementation en vigueur depuis 1972 (1) fixe la valeur des émissions à ne pas dépasser pour chacun des polluants CO et hydrocarbures, maximum variable avec le poids du véhicule. Ces valeurs limites ont encore été abaissées de 20 % pour le CO et 15 % pour les hydrocarbures en octobre 1975. Il est spécifié en outre

que la teneur en CO au ralenti ne doit pas dépasser 4,5 %. Cette réglementation, tout en étant à la portée des techniques disponibles, n'en a pas moins entraîné une réduction très substantielle des émissions : environ 50 % pour le CO et 40 % pour les hydrocarbures, par rapport aux émissions des modèles antérieurs. De nouvelles étapes de réduction des émissions incluant éventuellement la limitation des oxydes d'azote sont à l'étude au niveau communautaire. Mais un consensus général ne semble pas encore s'être dégagé en ce qui concerne l'accélération à donner à cette évolution.

La réduction progressive de la teneur en plomb des essences est également envisagée au niveau de la Communauté Européenne, mais pour l'instant les différents pays ne sont pas encore parvenus à un accord, l'Allemagne ayant adopté un calendrier de réduction du plomb beaucoup plus rapide que les autres pays (0,15 g/l au 1^{er} janvier 1976).

Il semble que les autres pays s'orientent vers 0,4 g/l (au lieu de 0,64 g/l) au 1^{er} janvier 1978 ou 1^{er} janvier 1979. En attendant, en France la teneur en plomb sera abaissée à 0,55 g/l en avril prochain.

En raison même de sa sévérité, la réglementation américaine a suscité un effort de recherche considérable dans le monde entier et de ce fait constitue une échelle de repères très souvent utilisée pour évaluer l'efficacité des solutions antipollution. Le tableau I rappelle les grandes lignes des normes fédérales et des normes californiennes. En Californie les conditions climatiques particulières et la concentration de véhicules existant dans le bassin de Los Angeles entraînent une pollution très agressive — le smog photochimique — ce qui a conduit cet état à jouer un rôle pilote en matière d'antipollution et à adopter des normes plus sévères qu'au niveau fédéral. Le calendrier initial prévoyait une discontinuité draconienne en 1975

TABLEAU 1 - NORMES E.U.A.

g/mile, () réduction %

Année	Cycle	FEDERALES			CALIFORNIENNES		
		HC	CO	NO _x	HC	CO	NO _x
Avant 1968	CVS - C*	9,9	121	4			
	CVS - CH*	8,7	87	4			
1972	CVS - C	3,4 (66)	39 (67)	"			
1973	CVS - C	3,4	39 (25)	3			
1974	CVS - C	3,4	39	3	3,2	39	2 (50)
1975 - 76	CVS - CH	1,5 (83)	15 (83)	3	0,9 (90)	9 (90)	2 (50)
1977	CVS - CH	1,5	15	2 (50)	0,41 (95)	9 (90)	1,5 (63)
Ancienne norme 1975	CVS - CH	0,41 (95)	3,4 (96)	3,1 (25)	0,41	3,4	1,5 (63)
Ancienne norme 1976	CVS - CH	0,41	3,4	0,40 (90)	0,41	3,4	0,40

* CVS - C : Constant volume sampling cycle froid
CVS - CH : Combinaison de cycles froid et chaud

puis en 1976, les limites déjà relativement basses de 1974 étant encore plus que divisées par 10 pour le CO et presque autant pour les hydrocarbures en 1975, avec pour 1976 une limitation supplémentaire extrêmement sévère à 0,4 g/mile pour les NO_x. On peut dire que les moteurs satisfaisant ces normes seraient pratiquement non polluants. Mais lorsqu'il s'est avéré que les technologies permettant de passer ces normes ne seraient pas prêtes à temps, des normes intérimaires ont été prévues pour 1975 et 1976. Puis est venue la crise de l'énergie. Comme les moyens capables à court terme de réduire très fortement les émissions de polluants et tout particulièrement les oxydes d'azote sont susceptibles d'entraîner une forte augmentation de consommation, comme d'autre part il s'est avéré que les normes concernant les NO étaient basées sur des données inexactes et trop pessimistes, de nouveaux délais ont été accordés. Les deux dernières lignes du tableau donnent la norme intérimaire actuellement en vigueur ainsi que celle prévue pour les modèles 1977. Ce sont également des jalons importants auxquels nous aurons souvent à nous référer. Quant aux valeurs qui seront finalement adoptées, elles ne sont pas encore fixées, plusieurs tendances contraires s'affrontant suivant que l'accent principal est mis sur l'antipollution ou sur l'économie d'énergie.

En ce qui concerne la teneur en plomb des essences, les normes intérimaires 75 californiennes nécessitent l'emploi de catalyseurs d'échappement qui sont empoisonnés par le plomb, et une qualité au moins d'essence sans plomb est distribuée dans toutes les stations services.

Nous allons maintenant examiner rapidement les principales solutions techniques permettant d'atteindre ces différents niveaux d'épuration des gaz d'échappement.

II. — SOLUTIONS TECHNIQUES BASEES SUR UNE AMELIORATION DE LA COMBUSTION

Les procédés capables de réduire les émissions des moteurs à allumage commandé se subdivisent très fondamentalement en deux catégories suivant qu'ils agissent sur la combustion ou qu'ils agissent après le moteur par épuration des gaz d'échappement à l'aide de différents appareils comme les catalyseurs ou les réacteurs thermiques.

Les procédés basés sur une amélioration de la combustion doivent être examinés en premier lieu et méritent une attention toute particulière car :

- ils sont généralement compatibles avec le souci d'économiser l'énergie ;
- ce sont les moins coûteux ;
- ils complètent nécessairement les procédés extérieurs lorsqu'il s'agit d'atteindre des degrés d'épuration très poussés.

II.1. — RAPPEL DES NOTIONS DE BASE.

Le dosage du carburant repéré par la richesse (*) du mélange constitue le principal facteur régissant à la fois les émissions des polluants et la consommation d'énergie.

L'effet de la richesse sur la combustion est schématisé sur la figure 1. En fonction de la richesse, la vitesse de combustion passe par un maximum situé en mélange riche (excès de combustible) avec une décroissance très rapide du côté pauvre, qui fait que lorsqu'on appauvrit le mélange, la vitesse de combustion tombe assez vite à une valeur insuffisante pour assurer un fonctionnement correct du moteur. Cette diminution de vitesse s'accompagne d'une augmentation également très rapide de la dispersion de cycle à cycle du diagramme de pression qui rend le fonctionnement instable et provoque des

(*) Richesse = (carburant/air) réel / (carburant/air) stoechiométrique.

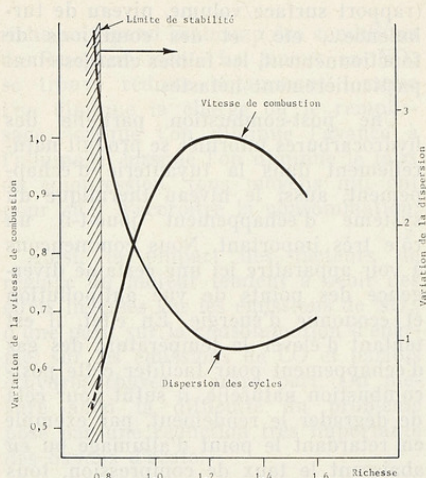


Figure 1 - EFFET DE LA RICHESSE SUR LA VITESSE DE COMBUSTION ET LA DISPERSION CYCLIQUE

à-coups dans la conduite du véhicule (problèmes de « driveability ») ; il existe ainsi une limite « pauvre » de richesse correspondant à l'apparition de ce fonctionnement instable. Cette limite, qui joue un rôle essentiel pour le contrôle de la pollution, dépend de la chambre de combustion (géométrie, niveau de turbulence..., etc.) et des conditions de fonctionnement ; ainsi, les faibles charges entraînent un déplacement de cette limite vers les mélanges riches. Un autre phénomène important intervenant sur cette limite est l'hétérogénéité du mélange et notamment la mauvaise répartition du carburant entre les cylindres que l'on constate sur beaucoup de moteurs. Comme c'est le cylindre le plus mal alimenté qui détermine la limite de fonctionnement stable, la moyenne limite sera d'autant plus élevée que la répartition sera plus mauvaise. En définitive, il est difficile de faire marcher un moteur en toutes circonstances en mélange pauvre et notamment lorsque le moteur est froid.

La figure 2 rappelle que la consommation spécifique passe par un minimum situé un peu avant la limite de stabilité, la remontée de la courbe tra-

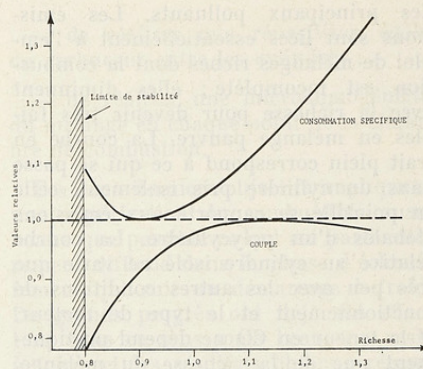


Figure 2 - EFFET DE LA RICHESSE SUR LA CONSOMMATION SPECIFIQUE ET LE COUPLE

duisant la réduction de la vitesse de combustion ; la valeur et la position de ce minimum dépendent évidemment beaucoup des caractéristiques du moteur et des conditions de fonctionnement. Sur la même figure, on voit que le couple passe par un maximum situé en mélange riche.

Examinons maintenant sur la figure 3 l'effet de la richesse sur la formation

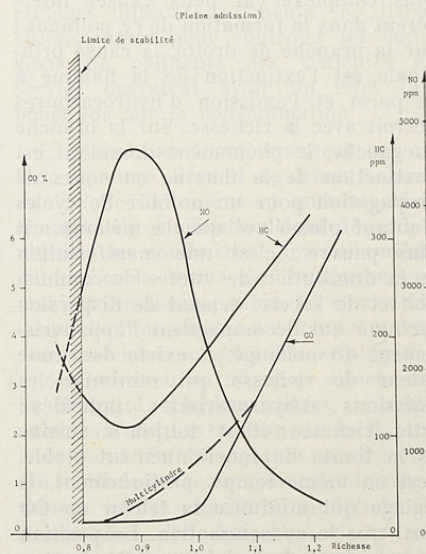


Figure 3 - EFFET DE LA RICHESSE SUR LES EMISSIONS DE POLLUANTS

des principaux polluants. Les émissions sont liées essentiellement à l'emploi de mélanges riches dont la combustion est incomplète ; elles diminuent avec la richesse pour devenir très faibles en mélange pauvre. La courbe en trait plein correspond à ce qui se passe dans un cylindre pris isolément, celle en pointillé se rapporte aux émissions globales d'un polycylindre. La courbe relative au cylindre isolé ne varie que très peu avec les autres conditions de fonctionnement et le type de moteur, et la teneur en CO ne dépend pratiquement que de la richesse du mélange. Ainsi, au niveau de chaque cylindre, le fonctionnement en mélange pauvre (avec excès d'air) est la condition nécessaire et suffisante de l'élimination de l'oxyde de carbone. Mais la plage de richesse où le fonctionnement est possible, dépend comme nous l'avons rappelé, de la chambre de combustion, de la répartition et des conditions de fonctionnement. En tout état de cause, la réduction des émissions de CO va de pair avec la réduction de consommation si l'on se reporte à la figure précédente. L'effet de la richesse sur les émissions d'hydrocarbures imbrûlés est plus complexe car deux causes interfèrent dans la formation de ce polluant ; sur la branche de droite, la cause principale est l'extinction de la flamme à la paroi et l'émission d'hydrocarbures décroît avec la richesse. Sur la branche de gauche, le phénomène dominant est l'extinction de la flamme en cours de propagation pour un nombre de cycles d'autant plus élevé que le mélange est plus pauvre ; c'est une manifestation de la diminution de vitesse de combustion et de l'accroissement de dispersion cyclique qui accompagnent l'appauvrissement du mélange. Il existe donc une valeur de richesse qui minimise les émissions d'hydrocarbures imbrûlés ; cette richesse étant toujours voisine de la limite de fonctionnement stable, c'est en même temps, pratiquement, le réglage qui minimise la teneur en CO ainsi que la consommation. La position et la valeur du minimum d'émissions dépendent de la chambre de combustion

(rapport surface/volume, niveau de turbulence..., etc.) et des conditions de fonctionnement, les faibles charges étant particulièrement néfastes.

Une post-combustion partielle des hydrocarbures imbrûlés se produit naturellement dans la tuyauterie d'échappement, aussi le niveau thermique du système d'échappement joue-t-il un rôle très important. Nous commençons à voir apparaître ici une certaine divergence des points de vue antipollution et économie d'énergie. En effet, il est tentant d'élever la température des gaz d'échappement pour faciliter cette post-combustion naturelle, il suffit pour cela de dégrader le rendement, par exemple en retardant le point d'allumage ou en abaissant le taux de compression, tous moyens d'ailleurs utilisés sur les moteurs américains.

Mais, en ce qui concerne la richesse, l'obtention de valeurs minimales de consommation spécifique, de CO et d'émissions d'hydrocarbures imbrûlés implique pratiquement un seul et même réglage de richesse. Ce réglage est malheureusement celui qui, en général, rend maximale la teneur en oxydes d'azote, les émissions de ce polluant passant par un maximum situé en mélange légèrement pauvre. Pour diminuer les oxydes d'azote à l'aide de la richesse, il faut enrichir le mélange, ce qui était une voie souvent envisagée avant la crise de l'énergie. Mais ce procédé augmente la consommation d'essence ainsi d'ailleurs que les émissions de CO et HC qu'il faut alors détruire par des appareils de post-combustion. Une diminution de NO_x serait également possible par appauvrissement si l'on ne se heurtait très rapidement à la limite pauvre de fonctionnement stable avec l'accroissement de HC et de consommation qui en résulte. Nous verrons plus loin par quels procédés on peut espérer appauvrir suffisamment le mélange sans accroître les émissions d'hydrocarbures et en gagnant sur la consommation.

Comme dans le cas des hydrocarbures, la courbe de NO_x en fonction de la

richesse dépend beaucoup des conditions de fonctionnement. La teneur en NO_x se trouve réduite notamment lorsque l'on diminue la charge ou le remplissage, lorsque l'on diminue l'avance à l'allumage, lorsque l'on diminue le taux de compression, tous moyens qui ont pour effet d'accroître la consommation.

Ainsi, la plupart des facteurs de réglage du moteur tendent à avoir des effets inverses sur les émissions de NO_x , d'une part, sur la consommation d'énergie, sur les émissions de CO et parfois d'hydrocarbures, d'autre part. On mesure ainsi la difficulté du problème posé par une réduction très importante des oxydes d'azote.

II.2. — MOYENS D'ACTION.

Ce qui précède montre la ligne à suivre pour réduire les émissions de polluants.

II.2.1. — Moteurs et carburateurs classiques.

En ce qui concerne les imbrûlés, CO et hydrocarbures, les moyens d'action se ramènent pour l'essentiel aux deux points suivants : fonctionnement en mélange pauvre et réduction de l'extinction à la paroi.

Le plus important est d'assurer un fonctionnement correct du moteur en mélange pauvre, au moins à charge partielle pour éliminer le CO, réduire les hydrocarbures et avoir une faible consommation. Pour ce faire, le facteur d'action essentiel est l'amélioration de l'alimentation en carburant. Il faut que le carburateur et l'ensemble du système d'admission permettent :

— d'obtenir la richesse voulue en chaque point de fonctionnement. Un mélange riche ne convient pas, mais comme nous l'avons vu, un mélange trop pauvre peut être pire si la combustion devient trop lente ;

— de réaliser une répartition égale du carburant entre les cylindres ;

— de réaliser une microhomogénéité du mélange en chaque point de la chambre de combustion.

Ces deux derniers objectifs impliquent une vaporisation du combustible aussi bonne que possible ce qui est particulièrement difficile dans la phase d'échauffement qui suit un démarrage à froid. De grands progrès ont déjà été effectués dans ce sens mais beaucoup reste à faire, et les résultats obtenus récemment au stade prototype avec de nouveaux carburateurs et de nouveaux systèmes d'admission (cf. ci-dessus) montrent la marge d'amélioration possible. L'injection électronique, dans la mesure où elle est convenablement réalisée et bien asservie au débit d'air, offre dans le même sens des possibilités intéressantes.

Le maintien du réglage de carburateur dans le temps est évidemment un élément important. L'emploi dans le carburant d'additifs détergents a pour effet de maintenir le carburateur propre et contribuer ainsi à préserver les réglages initiaux. De même, les dispositions prises pour contrôler les émissions de polluants des véhicules en service devraient avoir un effet très bénéfique sur la consommation.

L'aptitude au fonctionnement en mélange pauvre dépend également de la qualité de l'allumage et surtout de la chambre de combustion dont dépend la vitesse de combustion qui elle-même détermine la limite de fonctionnement stable en mélange pauvre. La conception de la chambre de combustion — notamment par son rapport surface-volume — a également une influence directe sur la quantité d'hydrocarbures imbrûlés provenant de l'extinction de la flamme à la paroi. De très grands progrès ont été réalisés au cours de ces dernières années, et les chambres modernes ont maintenant des émissions assez voisines à avance optimale, ce qui n'exclut évidemment pas la possibilité de nouveaux progrès.

Une fois optimisé, le moteur, du point de vue des émissions d'imbrûlés et du rendement, les émissions d'oxydes d'azote ne s'en trouvent généralement pas réduites, bien au contraire. Il faut donc faire appel à des méthodes complémentaires pour essayer de diminuer ce polluant sans trop compromettre le résultat obtenu.

Ce n'est évidemment pas le cas de l'enrichissement du mélange qui diminue les oxydes d'azote mais augmente la consommation et les imbrûlés. La réduction d'avance à l'allumage diminue les oxydes d'azote ainsi d'ailleurs, cette fois, que les hydrocarbures, mais augmente la consommation ; cependant, ce procédé offre souvent la possibilité de réaliser un compromis acceptable.

Le moyen le moins nuisible et très souvent utilisé en conjonction avec le retard à l'allumage, est la recirculation d'une partie des gaz d'échappement à l'admission du moteur (R.G.E.), ceci pour diminuer la température maximale du cycle qui a un effet exponentiel sur la formation des oxydes d'azote. Pour éviter des problèmes de combustion et de ratés d'allumage, le taux de recirculation est limité à un maximum de 15 %, ce qui permet de diviser par deux, environ, les émissions de NO_x . Dans la mesure où elle n'est pas trop importante, surtout aux très faibles charges, la recirculation des gaz d'échappement n'entraîne pas de conséquences trop fâcheuses sur la consommation, mais les émissions d'hydrocarbures imbrûlés sont généralement quelque peu accrues. La recirculation des gaz d'échappement tend à encrasser le circuit d'admission, on y remédie par l'emploi d'additifs détergents dans l'essence.

II.2.2. — Emploi de mélanges très pauvres.

Il existe une voie — nettement plus difficile et encore guère employée : l'utilisation de mélanges très pauvres, à des richesses nettement inférieures à celle qui correspond au maximum d'oxydes d'azote. En effet, à charge partielle,

il est théoriquement intéressant d'appauvrir fortement le mélange, jusqu'à une richesse limite d'autant plus basse que la charge est plus faible, mais à la condition essentielle que la vitesse de combustion reste suffisamment élevée malgré cet appauvrissement, ce qui n'est pas le cas avec les moteurs actuels surtout à faible charge. Si la vitesse de combustion est suffisante, on gagne alors sur tous les points : consommation, CO_2 , hydrocarbures et NO_x , si la richesse est assez basse.

Avec les chambres de combustion de type classique et un niveau de turbulence suffisamment élevé, on peut envisager d'appauvrir le mélange de façon substantielle grâce essentiellement à de nouveaux systèmes d'admission ou de nouveaux carburateurs qui améliorent l'homogénéité du mélange air-carburant et notamment la répartition du carburant entre cylindres. Il n'y a pas dans ce cas de discontinuité par rapport aux solutions précédentes, à cela près qu'ici, on abaisse suffisamment la richesse pour diminuer aussi les NO_x .

Le tableau 2 donne des résultats obtenus récemment avec quelques prototypes de ces nouveaux systèmes dont certains admettent une richesse limite de 0,75. Il

TABLEAU 2
Nouveaux systèmes d'alimentation

Type	HC g/mile	CO g/mile	NO_x g/mile
ETHYL T.F.S.			
BMW Origine	3,29	25,1	2,54
BMW + TFS	1,54	9,49	2,49 *
DODGE + TFS	0,38	5,34	1,69
+ réact. TH.			
SHELL VAPIPE			
Origine	2,2	16,4	5,4
Vapipe	1,5	3,7	4,6 *
DRESSER			
Origine	2,7	38	2,8
Dresserator	0,59	5,29	1,25
SERBUYS			
Origine	4	35	
Dispositif	0,9	7,5	2,7 *
Norme Californienne intermédiaire 1975	0,9	9	2

* Sans recirculation ni retard à l'allumage important

y a lieu d'indiquer que les résultats présentés ont souvent été obtenus avec des moyens complémentaires divers : réduction d'avance, recirculation de gaz d'échappement, réacteurs thermiques.

Le système Ethyl T.F.S. (4) (Turbulent Flow System), assure un brassage aérodynamique des gaz à l'admission. Le système Shell « Vapipe » (5) vaporise l'essence grâce à un caloduc qui transfère la chaleur de l'échappement à la section de vaporisation. Le système Dresser (7) est un carburateur à buse variable qui assure un écoulement sonique des gaz au col du venturi, ce qui provoque une très bonne pulvérisation. Le système Serruys (6) est un dispositif qui permet d'obtenir le dosage optimal de carburant pour chaque carburateur couple/vitesse de rotation et améliore la pulvérisation.

Certains de ces nouveaux systèmes de carburation et d'admission devraient permettre de passer les normes californiennes 1976 sans catalyseur et apporter un gain de consommation de l'ordre de 5 à 10 % par rapport aux moteurs actuels (7). Il convient cependant de préciser que ces dispositifs en sont encore au stade du prototype et qu'un travail de développement très important reste à accomplir pour qu'ils puissent être commercialisés.

Ces résultats rejoignent ceux que l'on peut obtenir avec des carburants gazeux tels que ceux fournis par la vaporisation des gaz de pétrole liquéfiés, et qui figurent en quelque sorte ce que l'on obtiendrait avec une carburation parfaite.

La combustion de mélanges homogènes doit permettre d'atteindre une richesse de l'ordre de 0,75.

Une diminution plus importante de richesse se heurte à de sérieux problèmes de combustion, même avec une carburation parfaite, et nécessite le recours à la stratification. Le principe de la stratification consiste à créer au voisinage de la bougie une zone riche, le reste du volume de la chambre étant occupé par de l'air ou un mélange très pauvre. Il est ainsi possible d'allumer et de brûler un mé-

lange globalement très pauvre. En ce qui concerne les oxydes d'azote, un effet supplémentaire peut provenir de ce que la partie haute température du cycle s'effectue avec un défaut d'air. Théoriquement, des gains de consommation de l'ordre de 20 % peuvent être attendus de la stratification. La stratification peut être obtenue soit par préchambre, procédé Honda CVCC (8), soit par voie aérodynamique avec injection d'essence [procédés FORD PROCO (9) ou TEXACO (10)], ou en conservant la carburation classique [procédé I.F.P. (11)] (Figure 4).

Jusqu'à présent, seul le moteur Honda CVCC utilisant un procédé à préchambre a atteint le stade de la commercialisation ; ce moteur a confirmé les excellentes performances antipollution attendues du procédé. On voit sur le tableau 3 que les niveaux d'imbrûlés extrêmement bas prévus initialement aux E.U.A. pour 1975 sont satisfaits ; les émissions d'oxydes d'azote, bien que trop élevées par rapport aux normes américaines 1976, satisfont en revanche largement les normes intermédiaires. En revanche, on ne constate aucun gain sur la consommation, mais au contraire une augmentation de l'ordre de 10 à 15 % au lieu de la réduction attendue. Les réglages améliorant la consommation entraînent un relèvement des émissions d'oxydes d'azote. Les procédés qui réalisent la stratification par

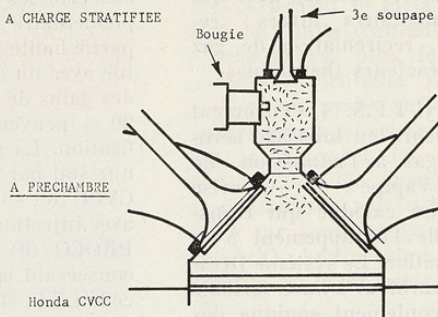
TABLÉAU 3
Moteurs à charge stratifiée

Type	HC g/mile	CO g/mile	NO _x g/mile	Effet sur la consommation %
HONDA				
Civic	0,21	1,96	0,8	+ 12
Impala	0,27	2,88	1,72	0
TEXACO				
Sans cat.	3,13	7	1,46	- 27
Sans cat. + (NO) [*]	3,00	6,69	0,84	- 14
Avec cat. + (NO) [*] (13)	0,36	1,41	0,35	+ 7
FORD				
Avec cat. + (NO) [*]	0,15	0,31	1,38	- 24
Norme Californienne intermédiaire 1975	0,9	9	2	
Ancienne norme américaine 1976	0,41	3,6	0,40	

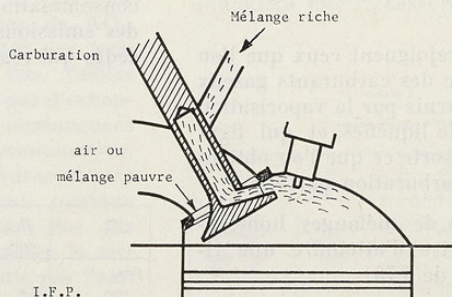
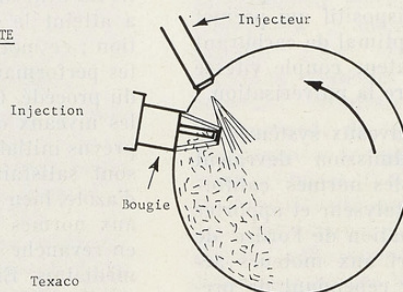
* Moyens spécifiques de réduction des émissions de NO_x : réduction d'avance, recirculation de gaz d'échappement.

Figure 4

MOTEUR A CHARGE STRATIFIEE



A CHAMBRE COMPACTE



aérodynamique à l'intérieur de la chambre de combustion (Ford, Texaco, I.F.P.) permettent des gains de rendement effectifs par rapport au moteur classique, mais leurs performances antipollution sont moins bonnes que dans le cas du moteur Honda et nécessitent l'adjonction

d'un réacteur catalytique pour atteindre des niveaux d'émissions très bas.

La crise de l'énergie a vigoureusement relancé l'effort de recherche sur le moteur à charge stratifiée, ce qui devrait conduire à de nouveaux progrès. Mais il

ne semble pas au vu des résultats actuels que l'on puisse descendre au-dessous de 1,5 ou 1 g/mile de NO_x si l'on veut en même temps faire du moteur à charge stratifiée un procédé économiseur d'énergie.

Au moteur à charge stratifiée s'apparente sur le plan des principes le *moteur Diesel* qui est également un moteur à mélange pauvre. La diésélisation du parc est souvent envisagée comme un moyen d'économiser l'énergie ; il en résulterait effectivement un gain de l'ordre de 15 % sur des parcours urbains. En ce qui concerne les émissions, le Diesel est excellent du point de vue du CO et des H.C. Pour les oxydes d'azote, avec la R.G.E., il pourrait atteindre 1,5 g/mile. Mais le Diesel pose des problèmes d'odeur et de bruit qui peuvent en retarder la diffusion et qui font l'objet pour cette raison de recherches importantes.

III. — MOYENS D'ACTION EXTERNES

Lorsque l'on vise des normes d'émission très basses et impossibles à satisfaire en agissant seulement sur la combustion, il n'y a plus d'autre recours que de faire appel à des moyens d'épuration extérieurs, montés sur la tuyauterie d'échappement.

III.1. — RÉACTEURS THERMIQUES.

Dans les réacteurs thermiques, on compte essentiellement sur la température des gaz d'échappement pour parfaire la combustion. Le temps de séjour des gaz est accru par différentes dispositions allant du simple agrandissement de la tuyauterie à des systèmes de chicanes plus ou moins compliqués. En outre, on réduit autant que faire se peut les pertes thermiques par une conception convenable de la paroi du réacteur. Les réacteurs thermiques peuvent être utilisés en mélange pauvre lorsque le moteur le permet ; dans ce cas, ils ne réagissent pas défavorablement sur la consommation, mais leurs performances antipollution sont moyennes bien qu'intéressantes. Ils

peuvent aussi être utilisés en mélange très riche avec injection d'air ; dans ce cas, leur efficacité est bien meilleure, mais au prix d'un accroissement de consommation très important. Pour cette raison, cette dernière classe de réacteur thermique est maintenant abandonnée.

III.2. — CATALYSEURS.

Les réacteurs catalytiques sont finalement les seuls procédés extérieurs qui aient été retenus pour obtenir des émissions très faibles. En particulier, le catalyseur a été la solution la plus généralement adoptée pour passer la norme intérimaire californienne 1975, solution que certains grands constructeurs ont étendu à l'ensemble de leur production bien que, en toute rigueur les normes fédérales n'exigent pas de catalyseur. Les catalyseurs permettent de réaliser la combustion complète des imbrûlés aux températures relativement basses — quelques centaines de °C — qui règnent dans la tuyauterie d'échappement. Ils sont constitués par un support céramique à grande surface spécifique (alumine par exemple) imprégné par les éléments catalytiques proprement dits (métaux précieux ou oxydes métalliques communs). Ils se présentent soit sous forme de billes ou de cylindres de quelques millimètres (fig. 5) (12), soit sous forme de blocs monolithiques. D'importants travaux de recherche ont permis d'aboutir à la mise au point de formules capables de conserver leur efficacité pendant les 50.000 miles que réclame la norme américaine à condition d'utiliser de l'essence sans plomb, les performances se détériorant très rapidement en présence de plomb.

Lorsque les normes imposent une réduction importante des émissions de CO et d'hydrocarbures, avec une réduction modérée des oxydes d'azote, ce qui est le cas des normes intérimaires 1975 de Californie et des anciennes normes américaines 1975, la solution la plus répandue consiste à utiliser un pot catalytique d'oxydation avec si nécessaire une recirculation des gaz d'échappement pour réduire la teneur en oxydes d'azote.

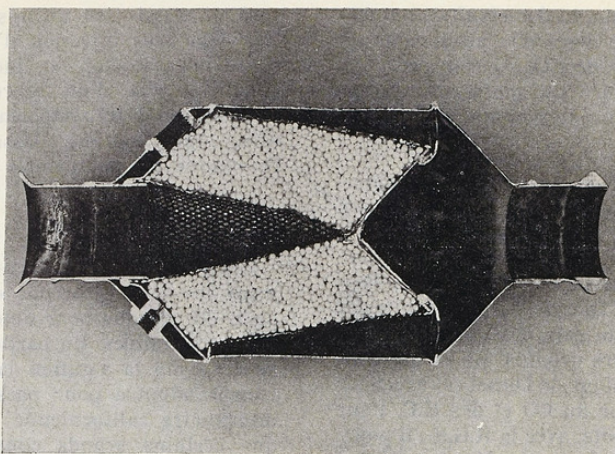


FIG. 5. — Coupe d'un réacteur catalytique à billes (Document I.F.P.) — (12)

Si l'on cherche à obtenir simultanément de très faibles émissions des trois types de polluants (anciennes normes américaines 1976), il faut faire appel à deux réacteurs catalytiques disposés en série sur la tuyauterie d'échappement : un premier pot de réduction, dont l'efficacité requiert un réglage légèrement riche du moteur, suivi d'un pot d'oxydation avec injection d'air à l'amont.

Une autre voie, un peu moins avancée, consiste à n'utiliser qu'un seul pot catalytique, un pot multifonctionnel, pour éliminer simultanément les trois polluants CO, HC, NO_x, ce qui est possible à condition de régler la richesse de façon très précise. Cette technique est maintenant envisageable grâce à l'utilisation d'une sonde à oxygène repérant à chaque instant la composition des gaz d'échappement et asservissant le débit d'un système d'injection électronique ou d'un carburateur à gicleur variable.

Le tableau 4 montre que l'efficacité du catalyseur d'oxydation est très bonne aussi bien suivant le cycle C.V.S. que suivant le cycle européen, malgré dans ce dernier cas un fonctionnement moyen à plus faible charge et plus faible niveau

thermique (13). Les normes intérimaires californiennes sont satisfaites sans difficulté par la combinaison pot catalytique + recirculation des gaz d'échappement. Le réacteur d'oxydation permet également d'atteindre le niveau de l'ancienne norme américaine 1975 (0,41 g HC/mile, 3,4 g CO/mile). Le double réacteur catalytique complété par la recirculation des gaz d'échappement satisfait, en émissions initiales, les anciennes normes américaines 1976 (0,4 g NO/mile) ; cependant, il ne semble pas qu'en l'état actuel de la technique, compte tenu du vieillissement du système, ce résultat soit conservé après les 50 000 miles de fonctionnement requis par la procédure américaine (14).

TABLÉAU 4

Efficacité du catalyseur d'oxydation
Emissions initiales

Cycle	C.V.S. - C.H.		C.E.S.	
	HC g/mile	CO g/mile	HC g/test	CO g/test
Sans catalyseur	1,8	20	10,9	70
Avec catalyseur	0,15	1,1	1,9	4,2
Efficacité (%)	92	95	83	94

Examinons maintenant les problèmes qui forment la contrepartie des excellentes performances obtenues sur le plan de la réduction des émissions d'oxyde de carbone, d'hydrocarbures et d'oxyde d'azote.

Dans le cas des catalyseurs d'oxydation, il faut d'abord signaler le problème d'ailleurs controversé et dont il est difficile d'apprécier l'importance réelle, de la formation de SO_3 à partir de SO_2 . Si ce problème se confirme, il faudrait envisager une désulfuration plus poussée de l'essence aux Etats-Unis, dont la teneur en soufre est d'ailleurs nettement plus élevée qu'en Europe du fait de structures de raffinage différentes. Bien entendu, l'emploi de catalyseurs de réduction ou multifonctionnels supprimerait cette difficulté.

En ce qui concerne le coût du système, le prix de revient des réacteurs catalytiques est relativement élevé et peut atteindre l'ordre de 700 à 1 000 F par véhicule, le catalyseur lui-même représentant de l'ordre de 10 % de ce prix.

Il faut maintenant considérer l'incidence du système catalytique sur la consommation et le coût du carburant. Dans l'état actuel de la technique, le maintien de l'activité des catalyseurs impose de supprimer les alkyles de plomb qui sont universellement utilisés dans les carburants pour augmenter l'indice d'octane. La suppression du plomb entraîne une baisse de l'indice d'octane de 6 à 7 points qui nécessite en moyenne une baisse du taux de compression de l'ordre de 1 à 1,5 point. Il en résulte un accroissement de consommation de 7 à 8 %, valeur maximale déterminée à performances constantes des véhicules (15). On peut rattraper partiellement cette chute d'octane et de rendement en augmentant l'indice d'octane de l'essence sans plomb par modification du raffinage, mais il faut tenir compte de ce que l'autoconsommation de la raffinerie augmente avec l'indice d'octane de l'essence produite. Il en résulte un indice d'octane optimal du point de vue énergétique pour lequel la perte est ramenée à environ

5 %. Mais ce gain est trop faible pour justifier les investissements très importants qui seraient nécessaires au niveau du raffinage pour l'obtenir, la tonne annuelle de pétrole économisée nécessitant un investissement notablement supérieur à la limite considérée comme raisonnable, soit 2 000 F/tonne annuelle économisée. On se limiterait donc à des indices d'octane assez bas. C'est ce qui a été fait aux E.U.A. où l'indice d'octane adopté est 91. Il en résulte donc en définitive une augmentation de consommation de l'ordre de 7 %.

Mais il y a un autre inconvénient lié à la suppression du plomb que ne traduisent pas les chiffres précédents. La suppression de cet additif entraînerait aussi de sérieuses difficultés pour le raffineur sur le plan de la souplesse, du fait que l'emploi d'alkyles de plomb est un moyen extrêmement commode et bon marché d'ajuster l'indice d'octane à la valeur voulue, compte-tenu des fluctuations de l'approvisionnement et de la demande.

Pour ces différentes raisons, la nécessité d'éliminer le plomb de l'essence constitue dans les pays européens un handicap sérieux pour le développement des catalyseurs. On voit donc tout l'intérêt que présenteraient des catalyseurs résistants au plomb ou tout au moins à des quantités modérées de plomb. C'est un problème difficile, mais qui n'est peut-être pas sans solution ; d'importants travaux de recherche lui sont consacrés.

Bien entendu, d'éventuels futurs moteurs à faible exigence en octane tels que des moteurs à charge stratifiée ou mieux encore des Diesel, élimineraient toutes ces difficultés. Mais leur impact ne peut être envisagé à court terme.

La suppression du plomb est la seule pénalisation énergétique à prendre en compte dans le cas des catalyseurs d'oxydation. En revanche, grâce au découplage qu'il apporte entre les fonctions épuration des gaz et production de travail mécanique, le catalyseur d'oxydation est compatible avec la plupart des procédés envisagés pour améliorer le rendement.

Il permet déjà de conserver le réglage optimal du moteur et de se passer d'artifices comme retarder l'avance à l'allumage, qui sont efficaces sur le plan de la pollution, mais détériorent le rendement. L'adoption des catalyseurs s'est traduite de ce fait aux Etats-Unis par une amélioration très nette de la consommation.

Dans le cas des catalyseurs de réduction, à l'accroissement de consommation dû à la suppression du plomb, s'ajoute celui qui est dû au mélange riche — environ 5 à 10 % d'excès de carburant qu'impose ce type de catalyseur. Le résultat est meilleur avec le catalyseur multifonctionnel qui n'utilise pas de mélange très riche, mais celui-ci et *a fortiori* le double catalyseur ne sont pas, bien entendu, compatibles avec les procédés qui visent à améliorer le rendement par appauvrissement du mélange et notamment avec les moteurs à charge stratifiée ou Diesel. Cependant, le catalyseur est sans doute le meilleur des procédés capables de satisfaire des normes d'émission très sévères à la fois pour les imbrûlés et les oxydes d'azote.

III.3. — PIÈGES A PARTICULES.

Dans ce qui précède nous n'avons considéré que l'aspect empoisonnement du catalyseur. S'il s'agit maintenant de diminuer les émissions de plomb dans l'atmosphère pour protéger l'environnement, la diminution du plomb dans l'essence n'est pas la seule solution envisageable, on peut aussi essayer de filtrer les gaz d'échappement. En effet la solution qui consiste à réduire la teneur en plomb des essences tout en maintenant l'indice d'octane à sa valeur actuelle (ce qui est nécessaire pour satisfaire le parc existant), est très onéreuse financièrement et énergétiquement comme le montre le tableau 5 (16). Le piège à particules permettrait d'obtenir le même résultat du point de vue de la protection de l'environnement sans modifier la teneur en plomb de l'essence. Plusieurs dispositifs ont été proposés à cet effet : filtres constitués de laine d'acier inoxy-

TABLEAU 5

Conséquences en France de la réduction de la teneur en plomb des essences

Teneur en plomb g/l	0,64	0,40	0,15
Investissement supplémentaire 10 ⁶ F	0	440	1 130
Coût supplémentaire par an 10 ⁶ F	0	240	560
Consommation de brut supplémentaire 10 ³ t	0	192	575

Calculé d'après (16).

dable enrobée d'alumine (17) ou cyclones en série avec des filtres (18). Avec ces pièges les émissions de plomb peuvent être réduites de 70 à 80 %, donc avoir le même effet que la limitation à 0,15 g/l pour un coût n'excédant pas 5 à 10 dollars par voiture, c'est-à-dire environ 5 fois moins élevé et sans effet sensible sur la consommation.

IV. — OPTIMISATION ELECTRONIQUE

Avec ou sans réacteur catalytique, la réalisation d'un compromis optimal entre consommation de carburant et réduction des émissions de polluants serait grandement facilitée par l'utilisation de micro-ordinateurs qui définiraient à chaque instant les meilleurs réglages en fonction des conditions de fonctionnement, de l'état thermique du moteur et des conditions ambiantes. Les progrès de l'électronique permettront sans doute d'envisager l'emploi de cette technique à un prix acceptable.

CONCLUSION

Si l'on s'en tient à une réduction modérée des émissions d'oxyde d'azote (émissions < 2 g/mile suivant le cycle CSVCH), on peut réduire les émissions d'imbrûlés jusqu'à 1,5 g HC/mile et 20 g CO/mile (réduction de 85 % par rapport aux moteurs antérieurs à la législation) par des modifications du moteur et à un

coût modéré (moins de 3 % du prix de la voiture). Les progrès réalisés ou envisageables en matière de carburation et de combustion permettent de penser que ces performances antipollution ne devraient pas empêcher l'obtention de gains de rendement substantiels (10 à 20 %) capables de compenser largement le coût des procédés utilisés. Cette marge de réduction des émissions représente donc le champ des objectifs qu'il est à coup sûr légitime de se fixer au moins à terme.

Toujours dans l'hypothèse d'une réduction modérée des émissions d'oxyde d'azote, le catalyseur d'oxydation devrait permettre d'atteindre 0,4 g HC/mile et 3 à 4 g CO/mile (95 % de réduction) sans autre contrepartie énergétique que celle qui est due indirectement à la suppression du plomb. La mise au point de catalyseurs résistants au plomb rétablirait dans cette zone une parfaite compatibilité entre dépollution et économie d'énergie. Les moteurs à charge stratifiée devraient pouvoir satisfaire des normes voisines sans perdre leur aptitude à diminuer la consommation d'essence.

Si l'on veut en outre réduire très fortement les émissions d'oxyde d'azote, il faut faire appel à deux réacteurs catalytiques (ou à un catalyseur multifonctionnel) dont la limite est de l'ordre de 0,4 g NO/mile. En plus de l'effet de la suppression du plomb, cette solution présente l'inconvénient de ne pas être compatible avec les procédés visant à économiser l'énergie par appauvrissement du mélange.

Le moteur Stirling à combustion externe permettrait d'aller plus loin encore dans la réduction des émissions tout en apportant un gain de rendement notable par rapport aux moteurs actuels, mais ce moteur ne saurait avoir d'impact sensible avant plusieurs décennies en admettant que les questions de prix et de fiabilité qui restent posées trouvent des réponses compatibles avec l'automobile.

Ce rapide tour d'horizon montre donc qu'il existe une vaste zone de compatibilité potentielle des objectifs antipollution et économie d'énergie, que les progrès de la recherche et de la technique tendent constamment à élargir. Cet espoir se trouve conforté par les derniers résultats de mesures de consommation publiés (19) par l'E.P.A. (Agence pour la Protection de l'Environnement — Etats-Unis) qui montrent que la consommation des véhicules américains après avoir augmenté de 14 % entre 1968 et 1974 a diminué en ce qui concerne les productions 1975 et 1976, ce qui se traduit en définitive par le fait que les modèles 1976 consomment moins en moyenne que les modèles 1968 malgré l'abaissement général du taux de compression et malgré le durcissement des normes en 1975.

Cependant ce résultat encourageant ne doit pas faire sous-estimer la difficulté du problème. La législation 75-76 est encore loin des objectifs antipollution que s'étaient fixés les E.U.A. et d'autre part, l'amélioration de la consommation par rapport aux modèles avant réglementation pourrait être nettement supérieure s'il n'y avait pas eu la contrainte pollution.

En fait, comme nous l'avons montré, la comptabilité entre économie d'énergie et dépollution devient de plus en plus difficile à réaliser au fur et à mesure que l'on augmente le niveau de sévérité des normes. Cette difficulté croît très vite à partir d'un certain niveau d'épuration, en même temps que le coût des solutions envisageables augmente rapidement.

Certes il convient avant tout de prendre en considération les effets de la pollution sur la santé publique. Mais il est important que les objectifs réglementaires concernant la pollution s'appuient sur des données écologiques et médicales aussi bien fondées que possible, particulièrement en ce qui concerne les oxydes d'azote dont l'élimination, nous l'avons vu, pose les problèmes les plus ardues. Les campagnes de mesures

de la concentration de polluants dans l'atmosphère ainsi que les recherches toxicologiques qui sont actuellement effectuées présentent donc un intérêt essentiel.

Parallèlement, les recherches entreprises dans le secteur des moteurs dont ce bref exposé ne donne qu'un aperçu très incomplet, devraient permettre de dégager des solutions capables simultanément d'améliorer le rendement et de réduire encore de façon substantielle les émissions de polluants. Mais il convient que le calendrier adopté pour les normes d'émission soit aussi progressif que le permet le maintien d'une qualité de l'air satisfaisante, de façon que les constructeurs soient en mesure

d'appliquer des techniques optimisées du point de vue du coût et de la consommation d'énergie. A cet égard la politique réaliste suivie jusqu'à maintenant en Europe en matière de lutte antipollution laisse le champ libre à de nouveaux et réels progrès.

Enfin les mesures réglementaires ou d'incitation prises pour économiser l'énergie ont un effet bénéfique évident sur la pollution.

L'effort entrepris dans tous ces domaines ne peut manquer de conduire à une utilisation véritablement rationnelle de l'énergie, qui préserve tout à la fois nos ressources énergétiques et la qualité de notre environnement.

Bibliographie

- (1) *Journal Officiel*. Septembre 1970, n° 70, 167.
- (2) *Federal Register*, vol. 36, n° 128, juillet 1971.
- (3) CHAPOUX (E.) et LE GUEN (H.) — « Influence des cycles de fonctionnement et des limites réglementaires sur la construction des véhicules et les dispositifs antipollution ». XIV^e Congrès FISITA, Londres, juin 1972.
- (4) ADAMS (W.E.). — « Ethyl turbulent flow system. A lean burn emission control system ». *Publication Ethyl Corporation*, Research Laboratories (1600 West Eight Mile Road, Ferndale, Mich. 48220 U.S.A.), décembre 1975.
- (5) LINDSAY (R.) et WILSON (J.L.). — « Heat pipe vaporization of gasoline ». *Conference C.C.M.S. Ann Arbor, Mich*, octobre 1973.
- (6) SERRUYS (M.). — « Une meilleure combustion peut-elle remédier à la pollution atmosphérique par les voitures à essence ». *Pollution Atmosphérique*, janvier-mars 1972, n° 53.
- (7) JOHN (J.E.A.). — « Lean Burn Engine Concepts. Emissions and Economy ». SAE paper 750930. *Automotive Engineering Meeting*, Detroit, Mich, 13-17 octobre 1975.
- (8) DATE (T.), YAGI (S.), INOUE (K.) et HATANAKA (T.). — « The development of the CVCC engine and the effect of fuel composition on exhaust emissions ». 9^e Congrès Mondial du Pétrole, Tokyo, mai 1975.
- (9) SIMKO (A.), CHOMA (M.A.) et REPKO (L.L.). — « Exhaust emission control by the Ford programmed combustion process PROCO ». SAE paper 720052. *SAE Automotive Congress*, Detroit, Mich, jan. 1972.
- (10) COLLOC (W.J.), MITCHELL (E.) et ALPERSTEIN (M.). — « A Stratified charge multifuel engine meets 1976, U.S. Standards ». 38^e Midyear API Meeting, Philadelphie, Pa, 16 mai 1973.
- (11) BAUDRY (J.). — « Nouveau procédé de combustion ». 7^e Congrès Mondial du Pétrole, Mexico, 1967.

- (12) PRIGENT (M.) et RAYNAL (B.). — *Document I.F.P. non publié*. Brevet français, n° 746395.
- (13) PRIGENT (M.). — « L'élimination des polluants dans les gaz d'échappement ». *Deuxième Etats Généraux de l'Environnement*, Rouen, 10 octobre 1973.
- (14) STERNLICHT (B.) et THUR (G.M.). — « Alternative prime movers for future automobiles ». *Second Symposium on low pollution power systems development* (OTAN-C.C.M.S.), Dusseldorf (R.F.A.), 4-8 novembre 1974.
- (15) *Teneur en Plomb des Essences*. Rapport du Comité Technique de l'Utilisation des Produits Pétroliers, Direction des Carburants, Paris, juin 1972.
- (16) VAN GULICK (H.). — « Refineries and engines as a single technical system ». *Journal of Automotive Engineering*, avril 1975.
- (17) CAMPBELL (K.) et DARTNELL (P.-L.). — « Emissions de particules par les voitures automobiles ». *Publication Octel* (8, rue Bellini, 75016 Paris), décembre 1971.
- (18) ADAMS (W.E.), MARSEE (F.J.) et LENANE (D.L.). — « Lead compatible emission controls. A route to improved fuel economy, Fuels and Lubricants Meeting, National Petroleum Refiners Association ». Houston, Texas, 7-8 novembre 1974.
- (19) AUSTIN (T. C.), MICHAEL (R. B.) et SERVICE (G. R.). — « Passenger Car fuel economy trends through 1976 », SAE paper 750957. *Automotive Engineering Meeting*, Detroit, Mich, 13-17 octobre 1975.

Quelques applications récentes de l'utilisation du froid (*)

par Michel ANQUEZ

Directeur de l'Institut International du Froid

1. INTRODUCTION

Si tout frigoriste français sait que l'année 1876 a été marquée par l'épopée transocéanique du « Frigorifique » de Charles Tellier, bien peu connaissent le rôle fondamental qu'a joué, à cette époque, la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, dans la diffusion des sciences et des techniques du froid, notamment en encourageant, même sur le plan matériel, les inventeurs.

Le Délégué Général de la Société a bien voulu me transmettre des extraits du *Bulletin*, où l'on trouve des informations fort intéressantes. En mars 1860, on fait rapport sur un appareil destiné à la production artificielle de la glace inventé par Ferdinand Carré, et la Société « se félicite d'avoir à honorer de sa plus haute récompense une si utile invention ». En 1861, le *Bulletin* reproduit une note de Ferdinand Carré, présentée à l'Académie des Sciences, relative à « une méthode de production du froid par moyen de l'absorption, par l'eau ou par d'autres corps, de gaz liquéfiés ou de vapeurs condensées » et, en janvier 1863, consacre 15 pages à une communication, fort élogieuse, de Pouillet sur cette invention. En 1867 et 1872, elle mentionne les appareils construits par Edmond Carré « pour la fabrica-

tion de la glace par l'évaporation dans le vide ».

La Société ouvre en 1875 un concours pour la conservation des denrées alimentaires et décerne une récompense de 500 F à Charles Tellier, à titre d'encouragement pour la poursuite de ses études sur l'utilisation du froid. En 1895, Charles Tellier reçoit une nouvelle récompense, de 1 000 F cette fois, pour couronner ses travaux sur la conservation de la viande et des produits alimentaires par le froid.

Il convenait de rappeler ici ces initiatives qui honorent la Société d'Encouragement, qui a tant fait, dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, pour encourager les chercheurs et les inventeurs, à un moment où aucune structure n'existait pour les assister. C'est peut-être pourquoi, à cette époque, de nombreuses tentatives françaises cherchent à faire de l'utilisation du froid, non plus une curiosité de laboratoire, mais une réalité industrielle.

Mais curieusement, l'ère des pionniers français s'éteint. Déjà, en 1895, Hirsch, dans le rapport qu'il présentait à la Société sur les travaux de Tellier, notait : « la France est restée en arrière... ; l'usage des viandes frigorifiées s'y est peu répandu ; elles ne sont guère

(*) Conférence prononcée le 6 mai 1976 devant la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

consommées qu'à l'état subreptice ». Pendant près d'un demi-siècle, les utilisations originales du froid se font rares en France. Il faut attendre la fin de la deuxième guerre mondiale pour retrouver des conceptions spécifiquement françaises des utilisations du froid. Mais aujourd'hui on peut estimer que notre pays joue un rôle honorable en matière de science et de technique du froid. Dans plusieurs secteurs, la France se situe même à l'avant-garde du progrès ; je me limiterai, à titre d'exemple, à citer des innovations marquantes dans les domaines suivants :

— les très basses températures, inférieures à -120°C , aussi bien au laboratoire que dans l'industrie (transport des gaz naturels liquéfiés, emplois originaux de l'azote liquide) ;

— l'entreposage frigorifique spécialement adapté à la conservation des denrées périssables à basse température.

2. LES TRES BASSES TEMPERATURES AU LABORATOIRE

Dans le domaine du *laboratoire*, il convient de signaler un record qui vient d'être établi par le Centre de Recherches sur les Très Basses Températures de Grenoble, dont les chercheurs ont obtenu les plus basses températures permanentes aujourd'hui réalisées.

Il y a un peu plus de 10 ans, les chercheurs anglais mettaient au point le premier réfrigérateur à dilution d'Hélium 3 dans l'Hélium 4, qui permettait de maintenir une température de l'ordre de 50 millikelvin. Depuis, de nombreux réfrigérateurs de ce type ont mis à la portée des laboratoires la gamme des températures inférieures à 1°K , jusqu'à environ 15 à 20 millikelvin. Cependant, des températures inférieures ne restaient encore accessibles que de façon transitoire, par désaimantation adiabatique ou par compression d'Hélium 3 liquide en solide.

Les Grenoblois ont réexaminé le fonctionnement des parties constitutives de ces réfrigérateurs et plus particulièrement les échangeurs de chaleur entre la phase chaude, riche en ^3He , et la phase froide, pauvre en ^3He , dont l'influence est prépondérante aux basses températures. C'est avec des échangeurs continus en poudre d'argent frittée, de grains de $0,5\ \mu$ et d'une surface totale d'environ $100\ \text{m}^2$ qu'ils ont obtenu un échange presque parfait. Ensuite ils ont modifié les évaporateurs existants pour obtenir les gros débits de ^3He capables de fournir une puissance frigorifique suffisante pour compenser les apports de chaleur parasite. Ils peuvent actuellement travailler de façon permanente à 3,2 millikelvin — et c'est cette très basse température permanente qui constitue le record. Les chercheurs de Grenoble espèrent encore mieux faire avec un réfrigérateur double de ^3He et de ^4He (par injection de ^4He superfluide).

3. LES TRES BASSES TEMPERATURES DANS L'INDUSTRIE

L'industrie utilise de plus en plus les très basses températures. Deux exemples seront cités ici : le transport des gaz naturels liquéfiés et quelques applications originales de l'azote liquide.

3.1. LES TRANSPORTS DE GAZ NATURELS LIQUÉFIÉS.

La France occupe une situation privilégiée dans la construction des navires transporteurs de gaz naturels liquéfiés, puisqu'en fin 1975, 62,5 % des méthaniers en service ($1\ 850\ 000\ \text{m}^3$) ont été construits à partir des conceptions propres à deux bureaux d'études français ; tous deux ont mis au point des méthodes de construction de cuves-membranes, l'un une membrane dite « gaufrée », l'autre une membrane en Invar, à très faible coefficient de dilatation.

Dans le cas de la technique *membrane gaufrée* (procédé Technigaz), la

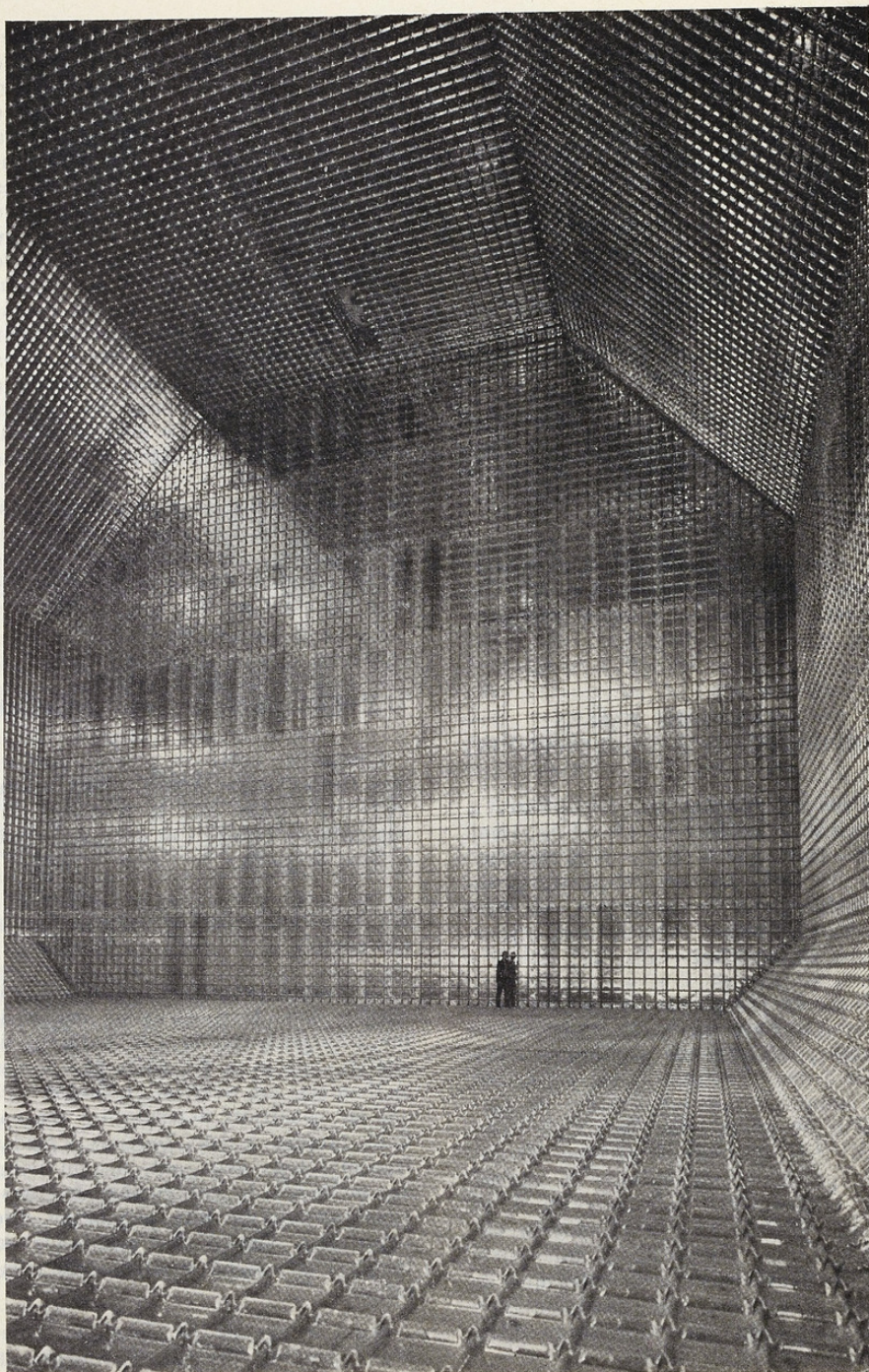


FIG. 1. — Vue générale d'une cuve à membrane gaufrée (système Technigaz).

structure de la cuve comprend une membrane d'étanchéité mince et souple, la barrière primaire, qui est appuyée sur une isolation porteuse incorporant une barrière secondaire. La barrière primaire est constituée par un assemblage complexe de tôles gauffrées de 1,2 mm d'épaisseur, en acier inoxydable 10-18 (10 % Ni, 18 % Cr), à très basse teneur en carbone.

Les différents panneaux élémentaires de tôle sont fixés à l'isolation porteuse, par soudure sur des pièces d'ancrage spéciales, solidement amarrées dans la structure isolante.

L'isolation et la barrière secondaire comprennent, en partant de la double coque du navire, deux éléments : des lambourdes en bois dur, fixées à la coque par des goujons et dessinant un quadrillage dont les vides sont bourrés de fibre de verre ; des panneaux sand-

wiches constitués d'un contreplaqué de 12 mm, de trois couches à fils croisés de balsa lamellé collé (épaisseur totale 150 mm), d'un contreplaqué en érable (formant barrière secondaire) et enfin d'une couche de « pavés » de balsa (50 mm d'épaisseur) dans lesquels sont noyées les pièces d'ancrage de la barrière primaire.

Cette technique permet de faire face aux variations de température des parois des cuves (de la température ambiante à -160°C) en créant artificiellement une membrane souple et élastique.

La cuve intégrée *membrane en Invar* (procédé Gaz Transport) repose sur un autre principe ; les variations de température sont absorbées par une membrane en Invar (alliage à 36 % de Ni), dont le coefficient de contraction thermique est très faible.

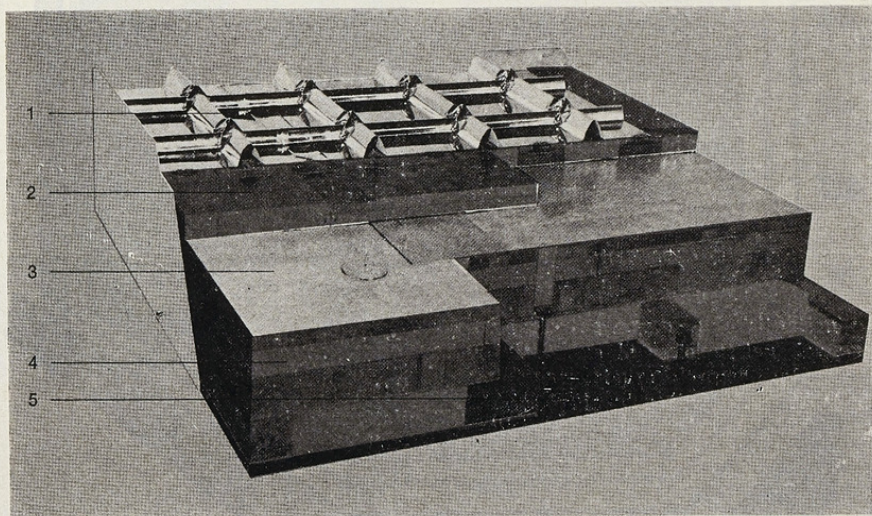


FIG. 2. — Coupe de l'ensemble barrière primaire, barrière secondaire, isolation (Système Technigaz) :

1. Membrane gauffrée.
2. Pavés de balsa (pour ancrage de la membrane gauffrée).
3. Barrière secondaire — contreplaquéérable.
4. Isolation : 3 couches balsa à joints croisés.
5. Coque.

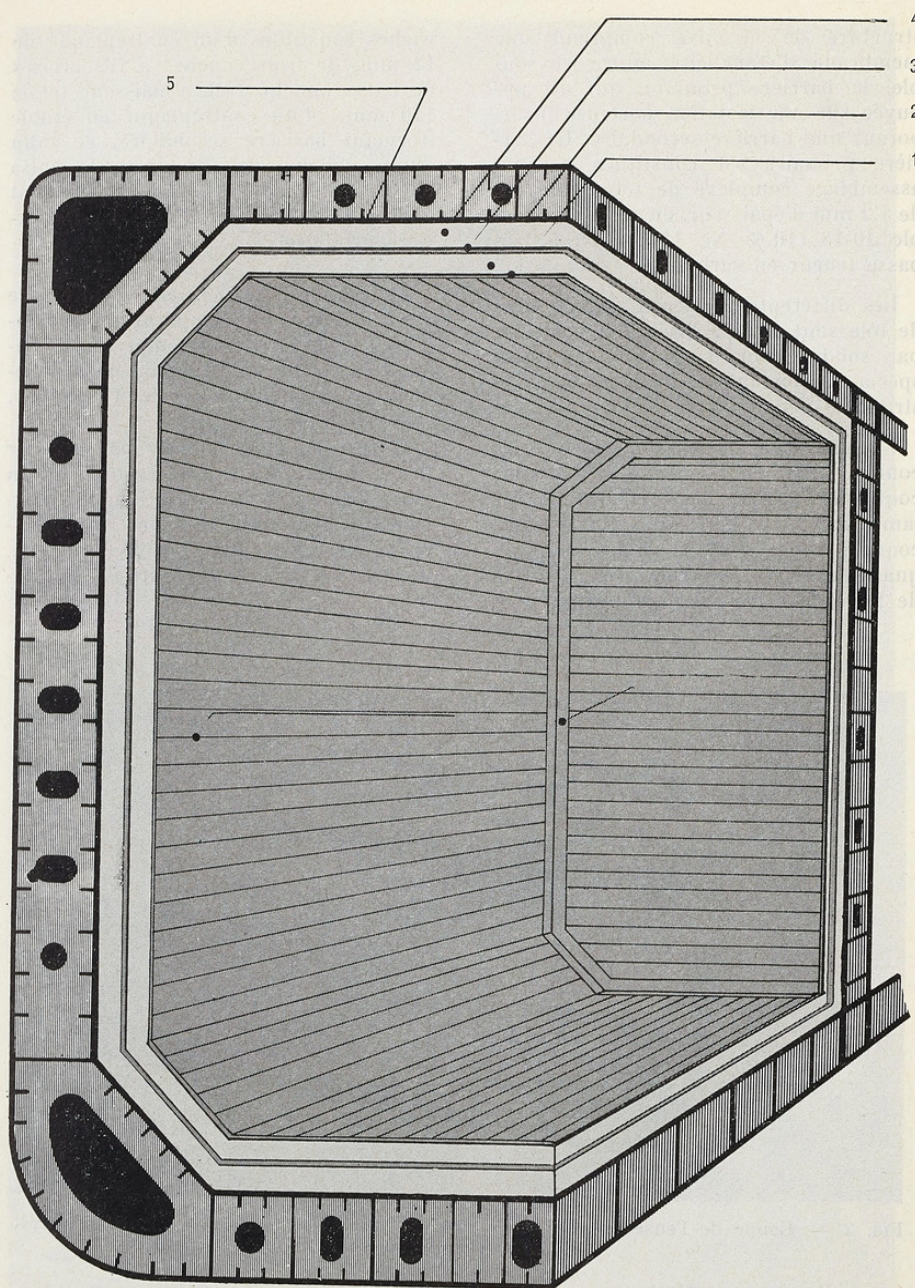


FIG. 3. — Coupe d'une cuve système Gaz Transport :

1. Membrane primaire.
2. Isolation primaire.
3. Membrane secondaire.
4. Isolation secondaire.
5. Coque.

Ici le revêtement intérieur des cuves comprend, entre la cargaison liquide et la double coque du navire :

— une membrane métallique en Invar, la « barrière primaire », en contact avec le liquide ;

— une isolation primaire, constituée par des boîtes isolantes d'une épaisseur de 20 cm, construites en contreplaqué et remplies de perlite ;

— une barrière métallique plane, la « barrière secondaire », également en Invar ;

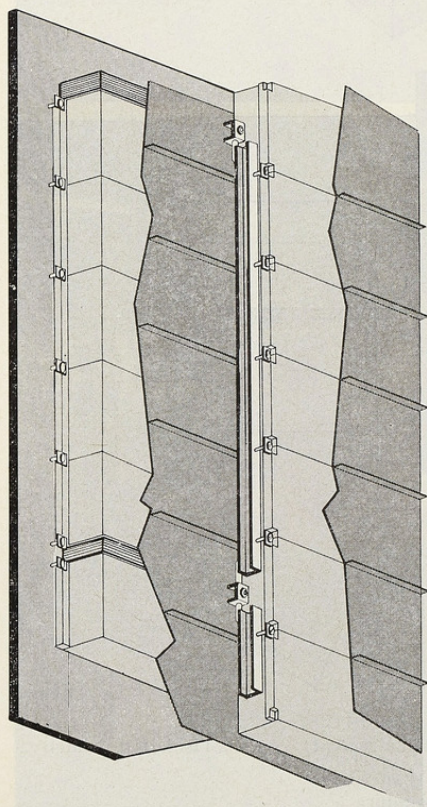


FIG. 4. — Détail du revêtement Gaz Transport, montrant les 5 éléments et les dispositifs d'ancrage.

— une isolation secondaire, constituée de boîtes isolantes, identiques à celle de l'isolation primaire, qui est appliquée sur la double coque du navire.

Les tôles en Invar se présentent sous formes de bandes, appelées « virures » dont les bords ont été relevés, puis soudés entre eux par résistance en incorporant une languette ancrée dans la boîte isolante. La soudure par points est effectuée automatiquement, par une machine spéciale.

Si la France a mis au point la première cette technique de cuves-membranes, il faut préciser qu'elle est confrontée à la concurrence sévère d'une société norvégienne, qui préconise des cuves sphériques.

3.2. QUELQUES APPLICATIONS RÉCENTES DE L'AZOTE LIQUIDE.

Refroidissement des plats cuisinés.

La restauration collective, qui se développe rapidement, utilise fréquemment des plats cuisinés à l'avance, stockés à 0 °C pendant un certain temps, 6 jours au maximum. Or, ces plats préparés sont très sensibles aux altérations microbiennes, et spécialement au développement des germes pathogènes.

Pour éviter ou limiter ce risque, le plus sûr moyen consiste à passer aussi vite que possible le cap des températures favorables au développement des microbes, en fait entre + 60 et + 10 °C. La réglementation française exige que le temps de préparation et de refroidissement soit inférieur à 2 heures. D'où l'idée de refroidir très rapidement ces préparations sur plateaux, dans une armoire en acier inoxydable, où le fluide de refroidissement est l'azote liquide. Il suffit d'injecter l'azote liquide dans l'armoire ; la vaporisation intervient immédiatement ; un ventilateur assure un brassage énergique, ce qui entraîne un refroidissement très rapide des produits : à titre indicatif, une portion de quiche lorraine passe de 70 °C à 10 °C

Barrière primaire

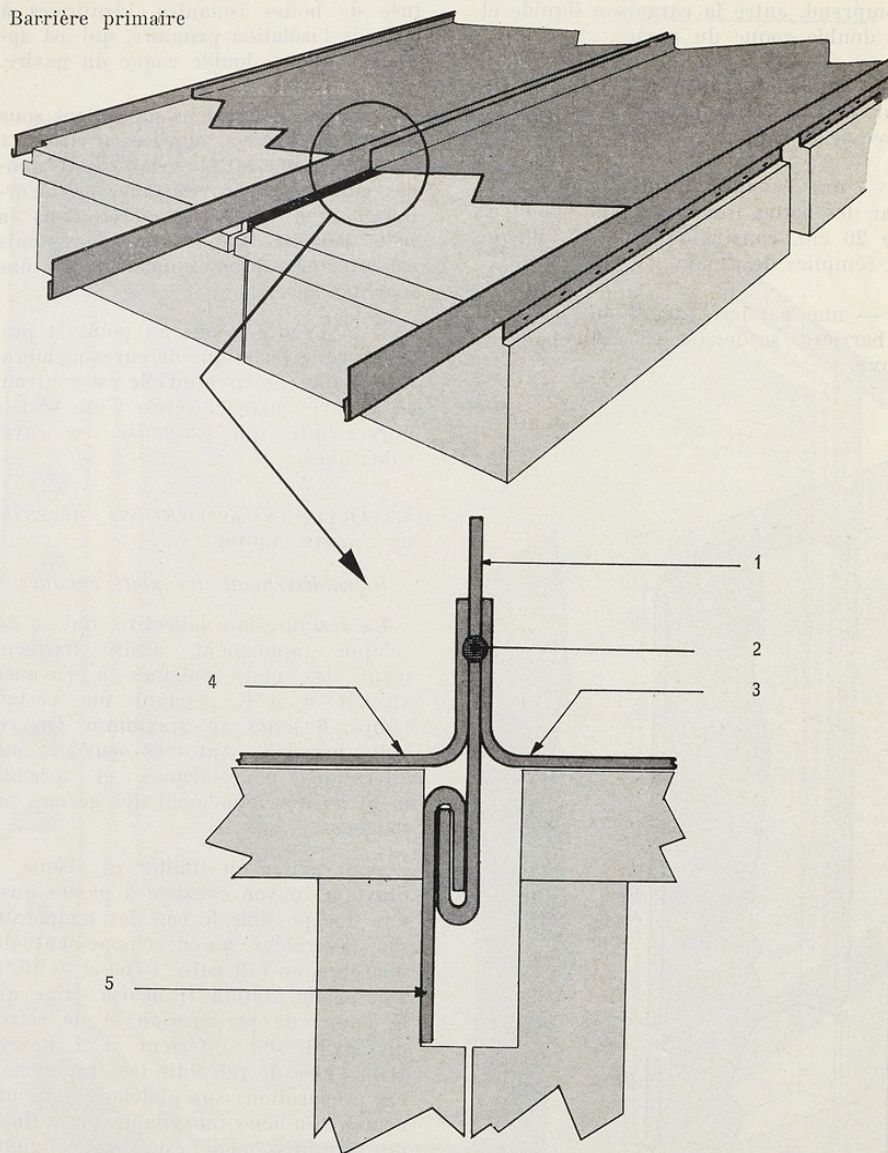
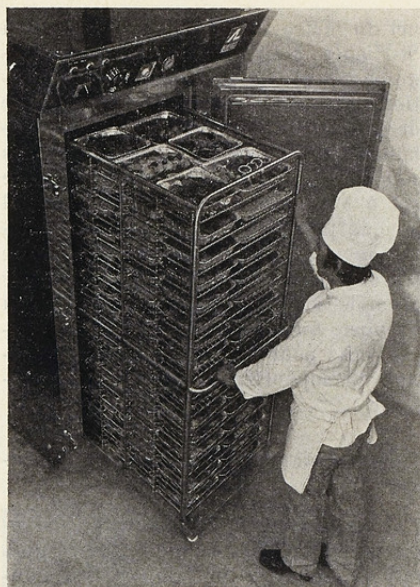


FIG. 5. — Soudure des virures de la barrière primaire. Ancrage dans l'isolation primaire.

- 1 et 5 — Languette d'ancrage.
- 2 — Point de soudure
- 3 et 4 — « virures ».



en 10 minutes et un ton de blanchir
dans un minimum de temps. L'opération
est faite à l'aide d'un appareil qui
permet d'obtenir une température de
-20°C. L'appareil est muni d'un
thermomètre et d'un régulateur de
température. L'opération est faite
dans un minimum de temps. L'opération
est faite à l'aide d'un appareil qui
permet d'obtenir une température de
-20°C. L'appareil est muni d'un
thermomètre et d'un régulateur de
température.

On voit que le processus de fabrication
des crèmes glacées fait intervenir
le refroidissement du produit. Jusqu'à
ce jour, le refroidissement des crèmes
glacées se faisait à l'aide d'un
appareil qui permettait d'obtenir une
température de -20°C. L'appareil
est muni d'un thermomètre et d'un
régulateur de température.

FIG. 7. — Introduction d'un chariot de plateaux de denrées, à refroidir rapidement, dans un « Cryosas ».

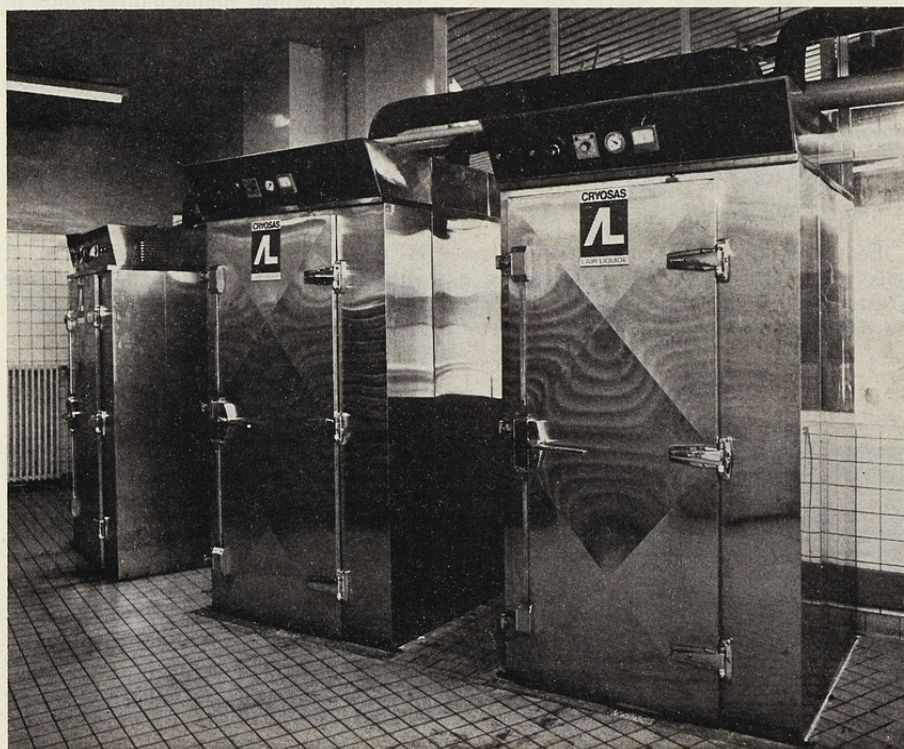


FIG. 7 bis. — Une batterie de 3 Cryosas : on notera le faible encombrement des appareils.

en 10 minutes et un rôti de dindonneau en 50 minutes. Si le thermostat est réglé à plus basse température, on peut obtenir, avec cette méthode, une surgélation rapide des aliments.

Une centaine d'installations de ce type fonctionnent actuellement en Europe, notamment dans des cuisines centrales de collectivités et dans des hôpitaux. Elles sont surtout utilisées pour la réfrigération et non pour la congélation.

Durcissement de crèmes glacées.

On sait que le processus de fabrication des crèmes glacées fait intervenir le durcissement du produit. Jusqu'ici, on utilisait exclusivement des équipements à air froid ou à plaques. Récemment, on a employé des tunnels à azote liquide qui permettent d'obtenir un durcissement très rapide — 2 minutes 1/2 pour des crèmes glacées de petites dimensions comme les cônes et les bâtonnets.

Plusieurs installations de ce type ont été mises en service en France et en Italie.

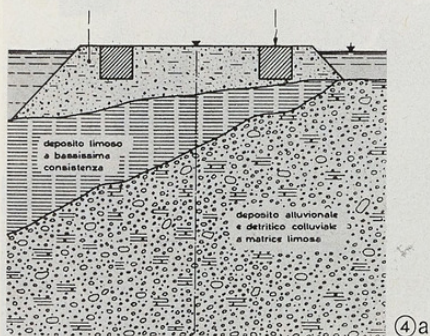
Congélation du sol.

Les techniques de congélation des sols sont utilisées depuis longtemps. C'est cette méthode qui a été adoptée au début du siècle pour creuser le tun-

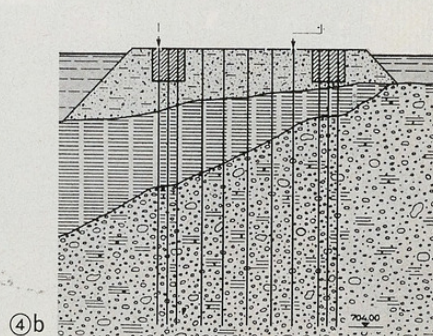
nel du métro sous la Seine à la station St-Michel. Mais l'emploi de l'azote liquide est récent dans ce genre d'opération, surtout lorsqu'on se trouve en face de sols sableux, gorgés d'eau, très « bouillants ». En enfonçant dans le sol des sondes à azote liquide, on refroidit le sol à très basse température : un sol boueux peut ainsi acquérir les caractéristiques du béton, ce qui permet de travailler sans danger. On a pu par exemple en Italie, sur l'autoroute du Brenner, forer dans un lac de très larges puits pour y couler des piliers destinés à supporter le tablier de l'autoroute.

Tunnel de refroidissement de ferrailles.

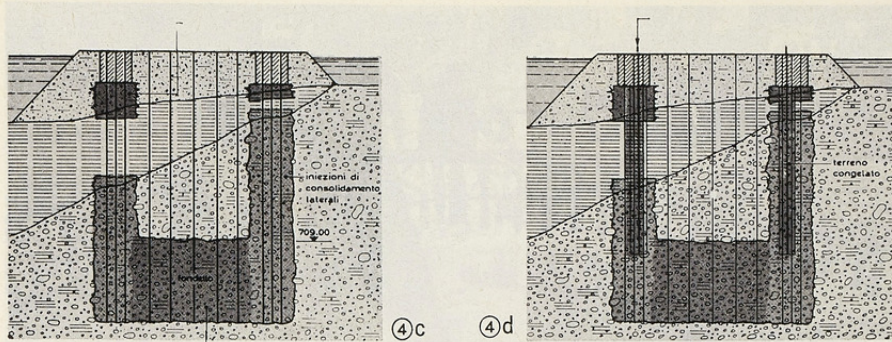
Avec la pénurie croissante de matières premières, les techniques de récupération prennent une importance nouvelle; on utilise maintenant l'azote liquide pour la récupération des ferrailles de vieilles voitures. Les carcasses sont comprimées dans une presse, puis traversent un tunnel de prérefrigration utilisant les frigories de l'azote gazeux, suivi d'un tunnel à immersion dans l'azote liquide. On peut alors séparer facilement, après broyage, les éléments ferreux (tôles et fontes à part) et non ferreux (cuivre, aluminium et autres). Une installation de ce genre fonctionne en Belgique, avec du matériel français.



1. Construction du remblai et du couronnement.

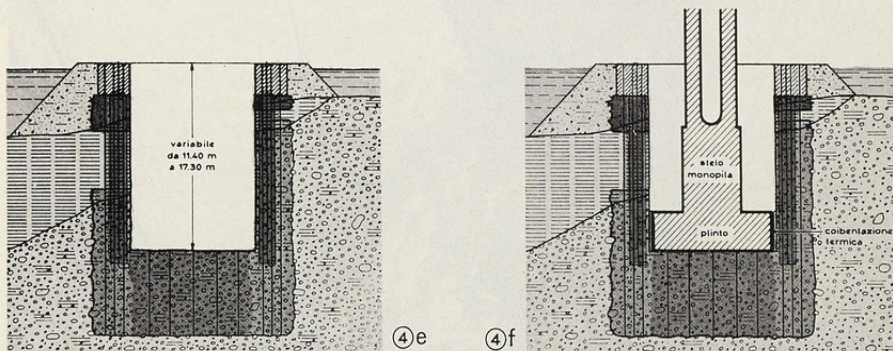


2. Perforation pour les injections.



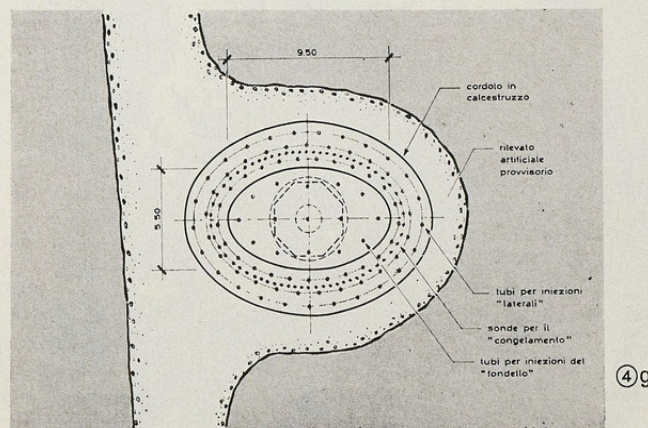
3. Injections (latérales et bouchons du fond).

4. Congélation.



5. Fouille (et entretien de la congélation).

6. Coulée de la pile.



7. Plan de la fondation elliptique.

FIG. 10. — Les différentes phases de l'opération de construction des piliers de l'auto-route, après congélation du sol :

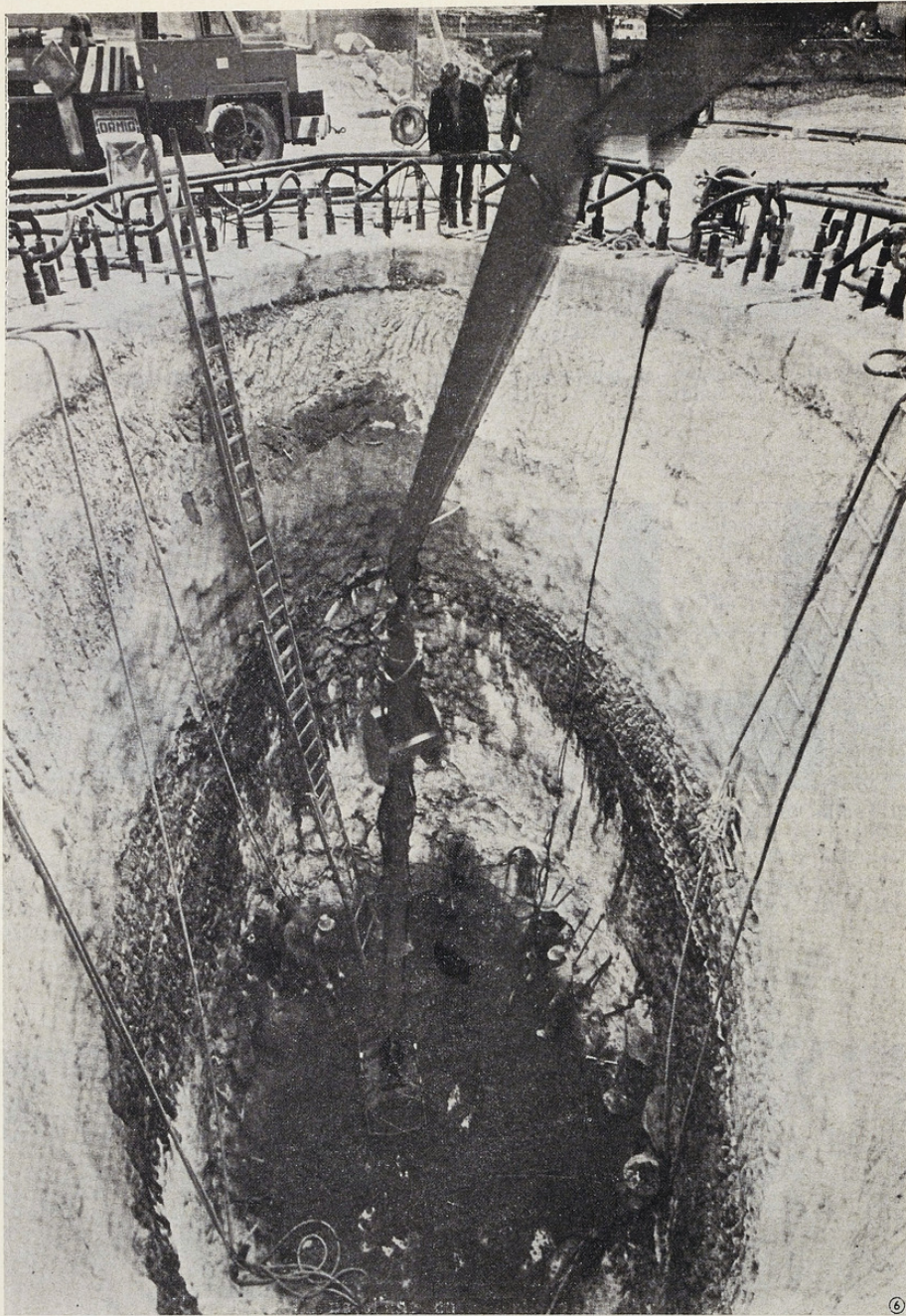


FIG. 12. — La congélation est terminée, mais entretenue. On peut creuser (c'est la phase V du schéma). On aperçoit le dispositif des sondes à azote liquide à la partie supérieure de la photo, ©

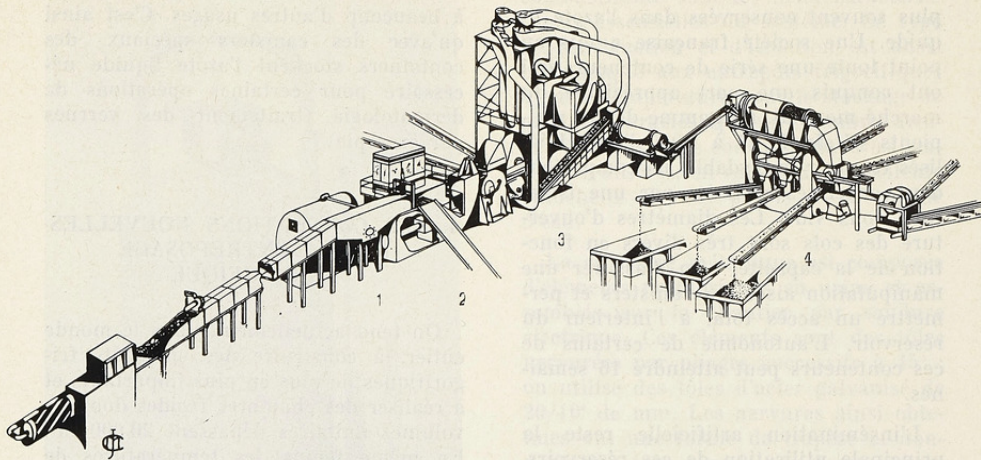


Fig. 13. — Tunnel de refroidissement de ferrailles :

1. Tunnel de prérefroidissement.
2. Sortie du bac et alimentation du broyeur.
3. Broyeur, dépoussiéreurs et nettoyage.
4. Criblage et séparation magnétique.

C'est aussi avec l'azote liquide que l'on ébarbe aujourd'hui le caoutchouc ; le seul concurrent est l'ébarbage manuel aux ciseaux que l'on utilise lorsqu'on dispose de main-d'œuvre à très bon marché (prisonniers).

Enfin, c'est encore avec l'azote liquide que l'on réalise le broyage de produits divers et notamment des matières plastiques. Une trentaine d'installations existent en France.

Conservation à long terme du sperme d'animaux reproducteurs.

On pratique depuis longtemps déjà l'insémination artificielle des animaux, notamment des bovins. Mais on s'est aperçu que cette technique procurait de bien meilleurs résultats si le sperme pouvait être conservé pendant plusieurs années, afin de pouvoir tester sur quelques descendants les qualités laitières ou bouchères des reproducteurs.

C'est pourquoi les paillettes ou les ampoules de sperme sont de plus en

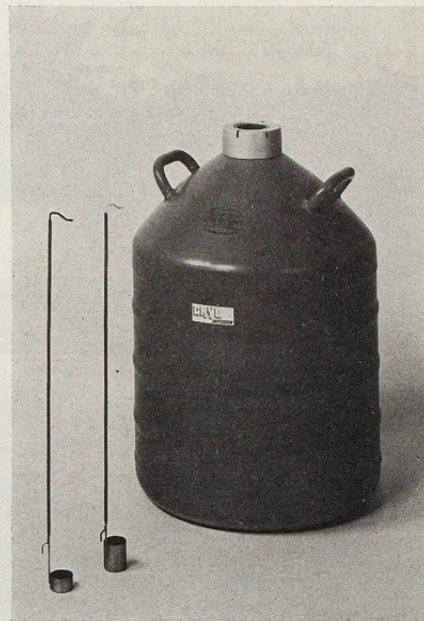


Fig. 14. — Un conteneur à azote liquide dit « dermacryo » pour le traitement de certaines opérations de dermatologie par azote liquide (verrues).

plus souvent conservées dans l'azote liquide. Une société française a mis au point toute une série de conteneurs qui ont conquis une part appréciable du marché mondial. La gamme de ces réceptacles s'étale de 11 à 1 000 litres. Réalisés en acier inoxydable, ils comportent deux enceintes séparées par une isolation, sous vide. Les diamètres d'ouverture des cols sont très divers en fonction de la capacité, afin d'assurer une manipulation aisée des canisters et permettre un accès total à l'intérieur du réservoir. L'autonomie de certains de ces conteneurs peut atteindre 16 semaines.

L'insémination artificielle reste la principale utilisation de ces réservoirs, mais ils peuvent aussi être employés

à beaucoup d'autres usages. C'est ainsi qu'avec des canisters spéciaux, des containers stockent l'azote liquide nécessaire pour certaines opérations de dermatologie (traitement des verrues par exemple).

4. DES CONCEPTIONS NOUVELLES POUR L'ENTREPOSAGE FRIGORIFIQUE

On tend actuellement, dans le monde entier, à construire des entrepôts frigorifiques de plus en plus importants et à réaliser des chambres froides dont les volumes unitaires dépassent 20 000 m³. En même temps, les températures de stockage sont de plus en plus basses.



FIG. 15. — Un conteneur de petit volume et un réservoir d'approvisionnement d'azote liquide.

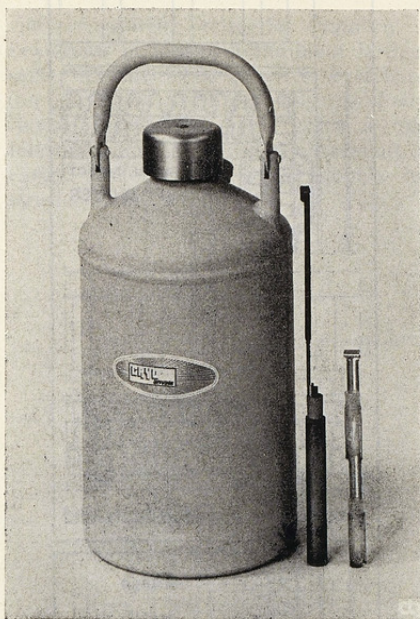


Fig. 16. — Un « minieryo » (1,5 l, en aluminium). Réalisé à la demande du P^r David de l'hôpital du Kremlin-Bicêtre. L'appareil est conçu pour le transport de paillettes contenant de la semence humaine congelée.

— 30 °C est devenu monnaie courante et on descend même à — 55 °C au Japon pour la conservation du thon. Les équipements français n'échappent pas à cette règle générale, mais en mettant en œuvre des conceptions originales, notamment en matière de gros œuvre et d'isolation (procédé Isométal). On vient aussi de construire en France, à Migennes (Yonne), un entrepôt entièrement automatique. Enfin d'autres particularités peuvent être notées, dans le domaine de la manutention et de l'équipement intérieur des chambres froides.

4.1. LE PROCÉDÉ « ISOMÉTAL ».

Ce procédé, breveté, consiste à réaliser une enceinte métallique parfaitement étanche aux gaz, rendue isotherme par l'adjonction de panneaux de fibres de verre incombustibles : étanchéité et in-

combustibilité sont les deux caractéristiques essentielles du système. Ce type de construction et d'isolation est aussi bien adapté aux entrepôts frigorifiques à basse température pour le stockage de produits surgelés, qu'aux chambres froides à atmosphère contrôlée dans les stations fruitières, en raison de l'excellente étanchéité de ses parois à la vapeur d'eau.

La structure métallique est composée d'éléments préfabriqués en usine et assemblés sur le chantier par soudure électrique. Ces éléments sont des tôles nervurées par pliages successifs à 45° ; on utilise des tôles d'acier galvanisé de 20/10^e de mm. Les nervures ainsi obtenues ont une forme de trapèze et donnent une très grande résistance mécanique aux éléments, d'une longueur de 5 m et d'une hauteur de 2,40 m. Ces éléments peuvent être soudés les uns aux autres, ce qui permet d'obtenir de très grandes dimensions, jusqu'à 100 m de long et 40 m de hauteur.

L'isolation est disposée à l'intérieur de l'enceinte métallique. On peut aisément employer dans ce cas la fibre de

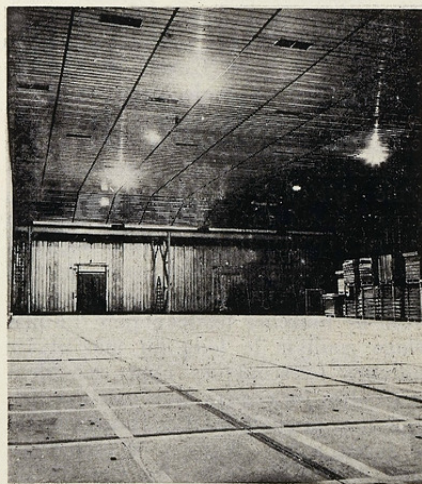


Fig. 19. — Vue intérieure d'une chambre froide réalisée suivant la technique Isométal, avec faux-plafond soufflant.

verre, malgré sa perméabilité à la vapeur d'eau, en raison de l'étanchéité exceptionnelle obtenue par la construction en acier soudé. On utilise généralement, pour les chambres à très basses températures, une épaisseur d'isolation de 300 mm. Le revêtement intérieur de l'isolation est constitué par un bardage en tôles minces d'acier galvanisé ou d'aluminium.

Cette technique, dont le prix est compétitif pour de vastes chambres froides (plus de 10 000 m³), permet une construction rapide. Elle entraîne, du fait de l'efficacité de l'étanchéité, une réduction sensible des dépenses d'exploitation (électricité), ainsi qu'une sécurité spéciale contre les risques d'incendie.

4.2. L'ENTREPÔT AUTOMATIQUE DE MIGENNES.

Les entrepôts frigorifiques entièrement automatisés sont nés aux Etats-Unis, il y a quelques années. Deux réalisations européennes, l'une en Espagne, l'autre en Italie, ont ensuite vu le jour. La France à son tour vient de construire le premier équipement de ce type, à Migennes (Yonne).

Il s'agit de l'extension d'un entrepôt existant classique ; cet agrandissement ne comprend qu'une seule chambre de 10 000 m³ à -30 °C, aux dimensions inhabituelles (80 m de longueur, 16 m de hauteur, 8 m de largeur), construite selon la technique « Isométal ». Sa caractéristique essentielle est l'automatisme intégral de la manutention. L'appareil-clé de l'installation est un chariot spécial, appelé transtockeur, essentiellement constitué par un mât portant un platelage porte-palette, muni de fourches télescopiques. Le platelage coulisse le long du mât et les fourches télescopiques approvisionnent en palettes les casiers d'un palettier installé dans la chambre. Ces transtockeurs — il en existe deux — se déplacent dans des allées, entre les rangées de palettiers. Un rail au sol et une glissière en partie haute permettent le déplacement du transtockeur. Un cha-

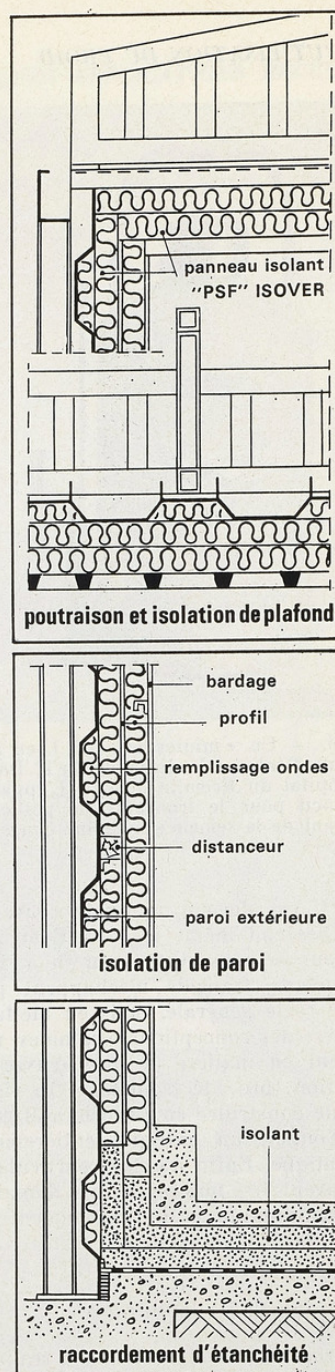


FIG. 20. — Coupes montrant la structure des plafonds et parois réalisés suivant la technique Isométal.

riot répartiteur relie la chambre à l'extérieur et assure notamment la desserte des allées en palettes à stocker (ou l'inverse). Tout cet ensemble fonctionne automatiquement, grâce à une télécommande et un asservissement à cartes perforées. Il n'y a jamais un ouvrier dans la chambre.

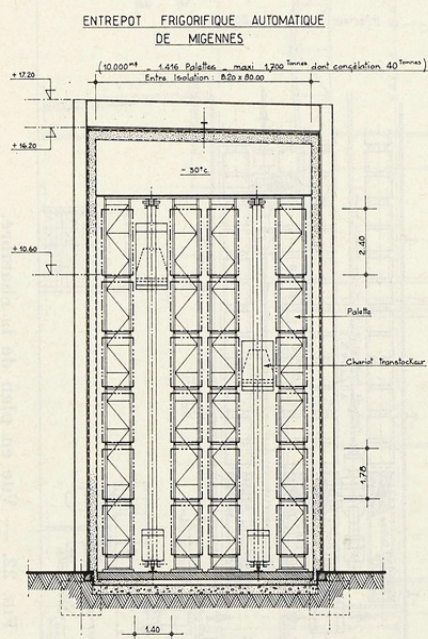


Fig. 21. — Coupe de la chambre froide entièrement automatique de Migennes. On remarquera le palettier sur 6 niveaux et les 2 chariots transtockeurs.

Cette installation est en outre équipée d'un dispositif original de congélation, breveté par la SETIF, le bureau d'études qui a conçu l'ensemble de l'installation. On utilise en effet les casiers du niveau supérieur du palettier, au voisinage de l'évaporateur, pour les transformer en tunnels de congélation que l'on peut isoler, automatiquement, du reste de la chambre à l'aide de panneaux mobiles.

4.3. AUTRES PARTICULARITÉS.

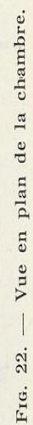
Manutentions.

Les problèmes de manutention préoccupent beaucoup les exploitants d'entrepôts frigorifiques, surtout lorsqu'ils sont amenés à préparer des commandes de produits surgelés. Certaines méthodes originales ont été mises au point ; par exemple, les entrepôts 3 et 4 du grand complexe que la STEF possède à Vitry sont d'une conception toute particulière. Ces installations se composent essentiellement de vastes chambres froides séparées en deux dans le sens de la hauteur. La partie supérieure est traitée comme une chambre froide classique, avec conservation de stocks morts sur trois ou quatre niveaux de palettes ; la partie inférieure contient de multiples piliers, qui supportent le niveau haut et qui délimitent des emplacements calculés pour que les palettes, sur deux niveaux, y trouvent place ; c'est à ce niveau bas que se prépare la distribution des colis. La liaison entre les deux niveaux se fait par un élévateur à palette spécialement conçu à cet effet.

D'autres dispositifs ont été inventés pour faciliter les manutentions ; par exemple, un outil de transfert pour les liaisons aériennes entre un circuit aérien fixe et une palette cadre. On a aussi imaginé de transformer une palette en caisse-palette en entourant une palette à convertisseur de cartons, maintenus par cerclage : ce système permet le stockage en vrac de certains produits destinés à l'industrie (des cassis par exemple) ; en outre, un basculeur a été mis au point pour la vidange de ces caisses-palettes.

Dallages préfabriqués au sol.

L'utilisation de dallages préfabriqués pour grandes chambres froides à basse température remplace aujourd'hui la technique traditionnelle du sol en ciment surmonté d'une chape d'usure, réalisé *in situ*. Cette méthode consiste d'abord à placer un lit de sable de



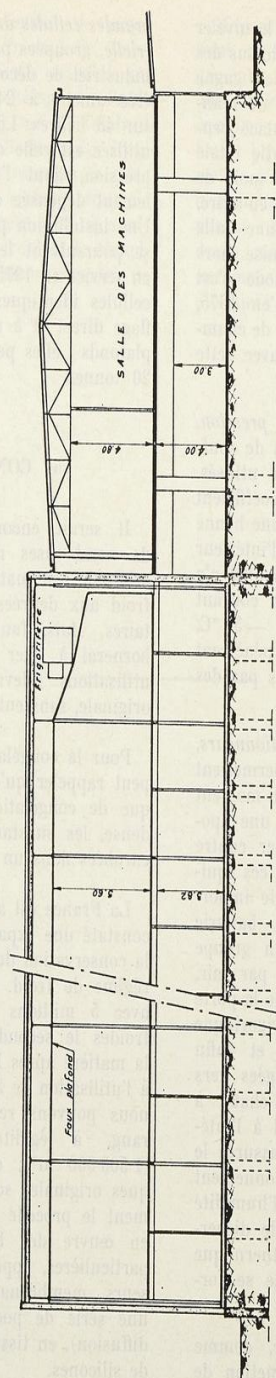


Fig. 23. — Coupe longitudinale de l'entrepôt Vitry 3 ; à la partie supérieure, stockage sur grande hauteur du stock mort ; à la partie inférieure, les emplacements pour les palettes de distribution.

2 cm sur l'isolation du sol, à le niveler soigneusement et à poser par-dessus des dalles préfabriquées (4 m²) ; on gagne ainsi du temps dans le délai de réalisation ; les dalles mises en place peuvent faire l'objet d'une garantie totale (elles ont au minimum deux mois de stockage à basse température) ; en outre, on peut aisément remplacer une dalle sans que la chambre soit mise hors service. Cette nouvelle méthode s'est rapidement répandue, puisqu'en 1975, plus de 50 000 m² de planchers de chambres froides ont été réalisés avec cette technique.

Les faux plafonds sous pression, munis de nombreuses bouches de soufflage sont de plus en plus utilisés. Ils permettent de réduire le coefficient de brassage tout en assurant une bonne homogénéité de température à l'intérieur de la chambre froide. Le personnel n'a pas l'impression de sentir un courant d'air, toujours désagréable à -30 °C, même si les hommes qui pénètrent dans la chambre sont protégés par des vêtements spéciaux.

Les sas munis de conditionneurs, dont le dispositif est breveté, permettent de limiter les pertes de froid au moment des ouvertures de portes : à une époque où l'on s'efforce de lutter contre les dépenses inutiles d'énergie, ces équipements sont de la plus haute importance. Ils comportent une batterie froide placée dans le sas, un groupe frigorifique à condensation par air, placé à l'extérieur, au-dessus de la porte de la chambre, un circuit frigorifique reliant ces deux ensembles, et enfin deux buses de soufflage dirigées vers le bas, formant voile d'air chaud à l'extérieur et voile d'air froid à l'intérieur. Il est ainsi possible d'assurer le brassage d'air et le conditionnement thermique du sas, de piéger l'humidité entrée dans le sas et enfin de disperser par effet dynamique et thermique les brouillards susceptibles de se former devant la porte.

Il convient ainsi de citer, comme initiatives récentes, la construction de

grandes cellules de décongélation industrielle, groupées par paires, car le cycle industriel de décongélation, ne pouvant être amené à 24 heures, reste étalé sur 48 heures. La source de chauffage utilisée est celle des gaz chauds, haute pression, dont l'énergie est habituellement dépensée dans les condenseurs. Une installation pilote de la CEGF, où se poursuivent les études, a été mise en service en 1975 : elle comporte deux cellules identiques de 260 m³ à soufflage direct et à reprise d'air par faux plafonds ; elles peuvent traiter chacune 20 tonnes.

5. CONCLUSIONS

Il serait encore possible d'étudier de nombreuses réalisations françaises originales en matière d'applications du froid aux denrées agricoles et alimentaires. Mais, faute de temps, je me bornerai à citer rapidement quelques utilisations relevant d'une conception originale, sans entrer dans le détail.

Pour la congélation, par exemple, on peut rappeler qu'on étudie une technique de congélation en milieu fluidisé dense, les substances à congeler étant enrobées dans un substratum inerte.

La France est aussi le pays où l'on a constaté une expansion remarquable de la conservation des fruits à pépins sous régime de froid. Ne sommes-nous pas avec 5 millions de m³ de chambres froides le second pays du monde en la matière après les États-Unis ? Quant à l'utilisation de l'atmosphère contrôlée, nous pouvons revendiquer le premier rang, à égalité avec les U.S.A. (1 500 000 m³) ; en outre, des techniques originales sont employées, notamment le procédé « Marcellin », qui met en œuvre des batteries de diffusion particulières, appelées échangeurs-diffuseurs membranaires, constituées par une série de poches (ou éléments de diffusion), en tissu enduit d'élastomères de silicones.

Il conviendrait également de noter l'emploi du froid en fromagerie, puisque le volume des locaux refroidis ou conditionnés, pour le hâlage ou l'affinage, dépasse 700 000 m³. Il faudrait notamment citer l'utilisation du froid pour le hâlage des fromages à pâte molle, technique de séchage contrôlé qui consiste, si l'on peut dire, à souffler simultanément le froid et le chaud, tout au moins à certaines périodes de l'année.

Mais il faut surtout dire, en terminant, que la technique française a largement débordé nos frontières, puisque désormais nous construisons des équipements frigorifiques dans de nombreux pays ; c'est qu'en effet une nouvelle génération de chercheurs et d'ingénieurs s'est levée chez nous, disposant de moyens importants sans doute, mais surtout animés d'un grand enthousiasme qui rappelle celui des pionniers du siècle dernier.

LE C.I.R.P.

LE COLLEGE INTERNATIONAL
POUR L'ETUDE SCIENTIFIQUE
DES TECHNIQUES
DE PRODUCTION MECANIQUE

1, rue Montgolfier, 75003 Paris
Tél. 277.37.75

vous prie d'assister à sa
26^e ASSEMBLEE GENERALE
SEANCE PUBLIQUE OFFICIELLE

A l'occasion de son 25^e anniversaire, le C.I.R.P. tient son Assemblée Générale du 30 août au 4 septembre 1976 à Paris. La Séance Publique Officielle aura lieu le mercredi 1^{er} septembre à 9 h 15 à L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 155, bd de l'Hôpital, 75013 Paris, sous la Présidence de M. Michel d'Ornano, Ministre de l'Industrie et de la Recherche, et de M^{me} Alice Saunier-Seïté, Secrétaire d'Etat aux Universités et sous le Haut Patronage de M. Jean Sauvagnargues, Ministre des Affaires Etrangères.

Après les allocutions des Ministres et du Président du C.I.R.P., deux conférences magistrales seront présentées :

- P. Bézier : *Rétrospective et Perspective des Industries Mécaniques.*
- E. Merchant : *Long Term Prospective in Production Engineering for the year 2000.*

Une traduction simultanée anglais-français sera assurée.

Tous les industriels et les ingénieurs français intéressés sont cordialement invités à cette séance.

Le Président de la Société, Directeur de la publication : H. NORMANT, D.P. n° 1080

I.T.Q.A.-CAHORS. — 60.207. — Dépôt légal : III-1976
Commission paritaire n° 34.665

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Fondée en 1801

Reconnue d'Utilité Publique en 1824

44, rue de Rennes, 75006 PARIS

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



HISTORIQUE

La « SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE » fondée en l'AN X de LA RÉPUBLIQUE (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'UTILITÉ 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 SOCIÉTÉ 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 DÉCERNE DES PRIX ET MÉDAILLES aux auteurs des inventions les plus remarquables et des progrès les plus utiles ainsi qu'aux ouvriers et contre-maîtres 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.

