

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
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	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	1977, n° 1
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1977

Collation	1 vol. (53 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	60
Cote	INDNAT (118)
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.118

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
1977 - N° 1

N° 1 1977

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

— La locomotive diesel face aux climats inhumains,

par R. BRUN, p. 3

— Musique et ordinateur,

par G. CHARBONNEAU et J.-C. RISSET, p. 31

— Problèmes actuels dans la lyophilisation des produits biologiques,

par M. LE PEMP, p. 41

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

La locomotive diesel face aux climats inhospitaliers (*)

par Raymond BRUN

I. — TRAFIC EN RETARD PENDANT L'HIVER

En février 1941, à Stockholm, l'empereur
du froid a fait perdre à la traction diesel
une partie importante de son trafic.
Il en a été de même aux conférences sur la traction
diesel.

Dans les contrées où le climat et la
géographie entravent la vie humaine,
une puissance avec une activité économique
croissante détermine le sentiment d'urgence
d'une autre traction électrique et traction
diesel est très peu de temps à l'œuvre.
Les conditions de ces deux
modes de traction s'expriment en un gra-
phique portant en abscisse le nombre
de trains et en ordonnée les dépenses
annuelles de traction, celles-ci comprises.

Les dépenses de capital ne sont pas
pris en compte.

Les dépenses de fonctionnement
sont prises en compte.

En raison du climat, le trafic en diesel
est en retardement pour un certain
nombre de lignes existantes sont retardées
dans les dépenses de fonctionnement.

La conférence prévue pour l'été de 1941
à Stockholm le 24 octobre 1941.

sont sensiblement proportionnelles au
nombre de trains. Les caractéristiques sont donc des
trajectoires rectilignes de l'origine (fig. 1). Le
taux de dépenses en traction vapeur est
plus élevé que la traction diesel du fait
de la consommation de combustible. Les
dépenses de traction vapeur sont
dans les rapports de 1,5 à 1, de 1,5 à 1 ou
de 1,5 à 1 selon que l'on considère le ser-
vice de Manœuvre, le service Maritime
diesel ou le service Voyageurs.

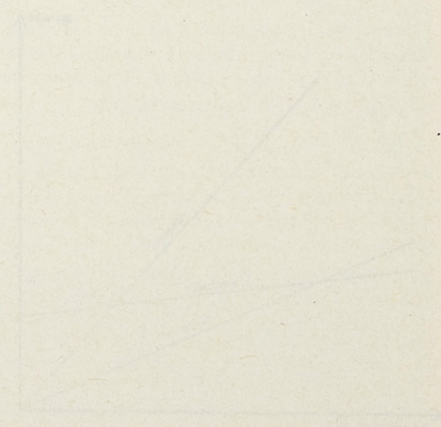


Fig. 1. — Les dépenses de traction en fonction du nombre de trains.

1977

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

REMARQUE : Les documents de la collection

ont été déposés dans la bibliothèque de la Cnam

12, rue de la Harpe, 75005 Paris, n° 512/77

La locomotive diesel *face aux climats inhumains (*)*

par Raymond BRUN

I. — TRACTION EN REGIONS TEMPEREES

En février 1964, c'est-à-dire à l'époque où la S.N.C.F. mettait en service les premières locomotives monodiesels de grande ligne, j'eus le privilège de présenter, ici même, une conférence sur la traction diesel.

Dans les contrées où le climat et la géographie autorisent qu'une population dense puisse créer une société économiquement développée, le seuil d'utilisation entre traction électrique et traction diesel est fixé par des impératifs économiques. Les rentabilités de ces deux modes de traction s'expriment en un graphique portant en abscisses la densité de trafic et en ordonnées les dépenses annuelles de traction ; celles-ci comprennent :

- les charges de capital engagé d'une part,
- les dépenses de fonctionnement d'autre part.

En traction autonome, vapeur ou diesel, les investissements pour aménagement de lignes existantes sont négligeables ; les dépenses de fonctionnement

sont sensiblement proportionnelles au trafic. Les caractéristiques sont donc des droites partant de l'origine (Fig. 1) ; le taux de dépense en traction vapeur est plus élevé qu'en traction diesel du fait, essentiellement, de l'excellent rendement énergétique de cette dernière : en effet, le nombre de calories consommées varie dans les rapports de 13 à 1, de 8 à 1 ou de 6 à 1 selon que l'on considère le service de Manœuvre, le service Marchandises ou le service Voyageurs.

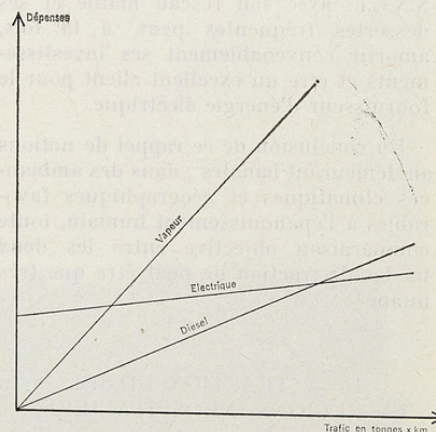


FIG. 1. — Rentabilité des divers modes de traction.

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 21 octobre 1976.

En traction électrique, les taux de dépenses requis pour assurer une unité de trafic sont faibles mais les charges de capital sont lourdes, car les sous-stations et caténaires coûtent cher, même pour un trafic faible ; la caractéristique est donc une droite faiblement montante partant d'un point de l'axe des ordonnées correspondant aux charges de capital et d'entretien des installations fixes.

Au total, la traction diesel s'avère économiquement préférable à la traction électrique sur celles des lignes qui ne connaissent qu'un trafic modéré.

Le seuil de rentabilité diffère, évidemment, d'une contrée à l'autre en fonction du coût de l'énergie dépensée aux roues motrices, du coût de la main-d'œuvre, de la régularité que le trafic présente dans le temps, de la répartition dans l'espace des lignes assurant le trafic.

A titre d'exemple, l'exploitation en traction électrique d'une longue ligne transversale à trafic spasmodique et à voie unique exigerait des installations fixes difficiles à amortir, chères à entretenir et impliquerait de considérables pertes d'énergie en ligne. A l'opposé, la S.N.C.F. avec son réseau maillé et ses dessertes fréquentes peut, à la fois, amortir convenablement ses investissements et être un excellent client pour le fournisseur d'énergie électrique.

En conclusion de ce rappel de notions au demeurant banales : dans des ambiances climatiques et géographiques favorables à l'épanouissement humain, toute comparaison objective entre les deux modes de traction ne peut être que très nuancée.

II. — TRACTION DIESEL EN REGIONS INHOSPITALIERES.

Il est patent que ces considérations et les études qu'elles motivent n'ont de valeur que dans la mesure où les conditions géographiques et climatiques l'autorisent.

Lorsqu'un tel choix est exclu, la traction diesel reste seule en lice.

1° MONTAGNES ROCHEUSES.

Les deux aimables régions que sont le Middle West des U.S.A. et la côte du Pacifique sont séparées par deux importantes chaînes de montagnes longues, continues et abruptes : les Montagnes Rocheuses à l'Est, la Sierra Nevada à l'Ouest, culminant toutes deux à plus de 4 000 mètres d'altitude, enfermant un plateau désertique de 1 000 kilomètres de large, dont l'altitude de base est 1 200 mètres, mais qui est sillonné de chaînes secondaires dont certaines dépassent 3 000 mètres d'altitude. En conséquence, aller de Seattle, San Francisco ou Los Angeles à Chicago, Saint-Louis ou New-Orléans équivaut à se déplacer de Paris à Moscou en franchissant deux fois le col du Galibier aux deux extrémités d'une large zone dépourvue pratiquement d'eau lorsqu'elle n'est pas recouverte par plusieurs mètres de neige : le dépôt de Roseville du Southern Pacific comprend à son effectif 70 locomotives diesels à chasse-neige rotatif.

La traction électrique est exclue ; le Great Northern l'a essayée ; il l'a abandonnée après quelques années d'expérience.

Il avait fallu attendre 1869 pour que la liaison ferroviaire Est-Ouest fut établie par des compagnies privées auxquelles l'Etat Fédéral avait consenti des avantages financiers et octroyé des concessions territoriales telles que l'une de ces compagnies se déclara « The Railroad that built an Empire ».

Les dirigeants de ces réseaux eurent rapidement conscience de la difficulté d'assurer un trafic rentable sur des lignes aux tracés et profils ingrats. Convaincus de l'obligation économique de dessertes par trains lourds, ils adoptèrent l'attelage central permettant une poutre de traction pratiquement continue et mirent en service des locomotives à vapeur de plus en plus puissantes qui culminèrent en 1941 aux célèbres

« Big Boys » (fig. 2). Ces locomotives à vapeur, capables de développer 6 700 chevaux au rail, mesurent 40 mètres de long, pèsent 290 tonnes dont 200 sur 6 ou 8 essieux moteurs à roues de 1,75 mètre qui assurent un effort au crochet de 50 tonnes ; elles sont suivies d'un tender à 7 essieux pesant

175 tonnes, capable de 27 tonnes de combustible et de 110 mètres cubes d'eau, car l'eau est rare, chemin faisant.

Le combustible est du fuel lourd, technique de chauffe qui, soit dit en passant, avait été lancée en 1868 par Sainte-Claire Deville sur une locomotive française.

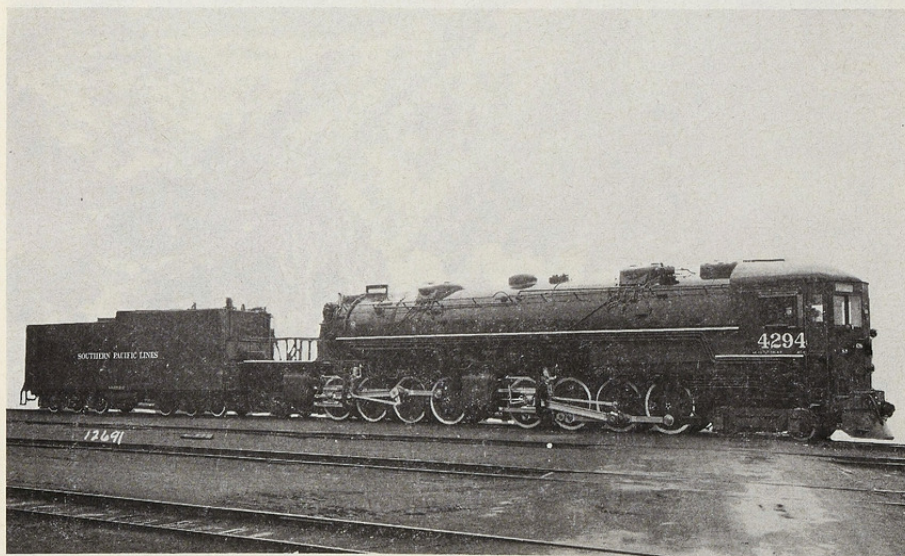
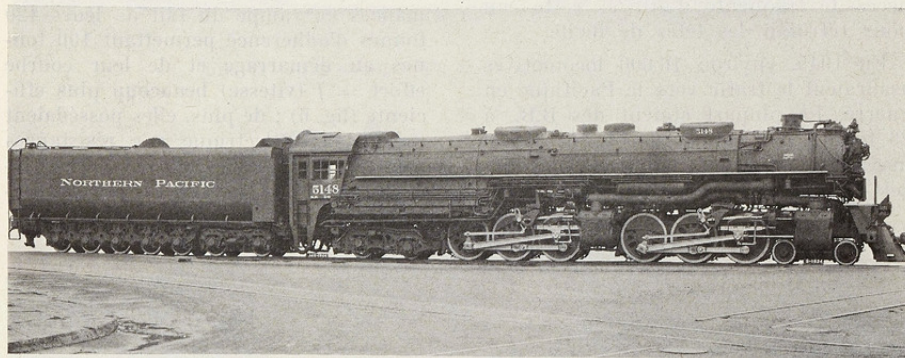


FIG. 2. — Locomotive « Big Boy ».

La carrière de ces monstres magnifiques fut éphémère (fig. 3).

En effet, le 7 décembre 1941, l'attaque japonaise sur Pearl-Harbour entraînait la mise en service immédiate de locomotives diesels ; même en mettant de côté les avantages de performance (rendement et rayon d'action) qu'apportait la traction diesel, les locomotives à vapeur étaient condamnées car leur consommation en eau n'aurait pu être satisfaite, surtout compte tenu de la nécessité fréquente d'utiliser cette eau pour refroidir les têtes de bielle.

En 1945, environ 10 000 locomotives assuraient le trafic vers le Pacifique en guerre. La plupart étaient des B.B., à 26 tonnes par essieu (fig. 4), à vitesse maximale 110 km/h, équipées d'un diesel de 1 300 ou 1 500 chevaux. Elles

assuraient un trafic intense puisque, sur les lignes du seul réseau Atchison, Topeka and Santa Fe, 1 800 trains étaient chaque jour en service entre le Mississippi et le Pacifique.

Pour assurer les grands trains allant d'un bout à l'autre, 4 locomotives étaient rassemblées en un ensemble caréné de 65 mètres de long à 16 essieux moteurs (fig. 5). Avec 5 400 chevaux installés seulement, elles assuraient le trafic des Big Boys avec de meilleures performances en rampe du fait de leurs 420 tonnes d'adhérence permettant 100 tonnes au démarrage et de leur courbe effort = f (vitesse) beaucoup plus efficiente (fig. 6) ; de plus, elles possédaient un freinage électrique sur résistances ventilées qui permet d'assurer, en descente, un effort de retenue de 45 ton-

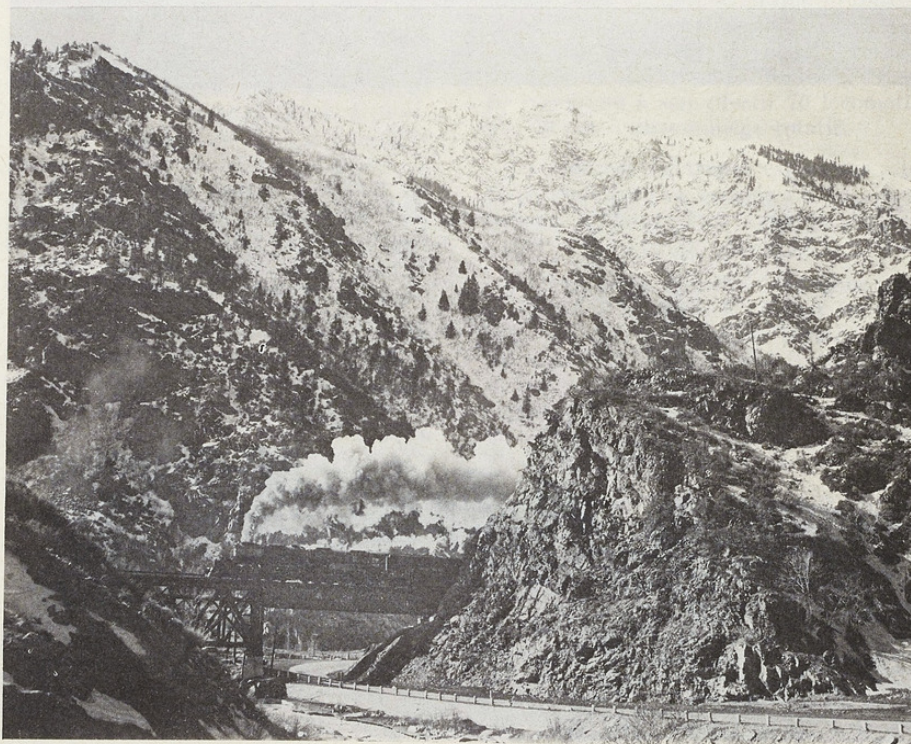


FIG. 3. — Locomotive Big Boy de l'Union Pacific dans l'Echo Canyon (Utah).

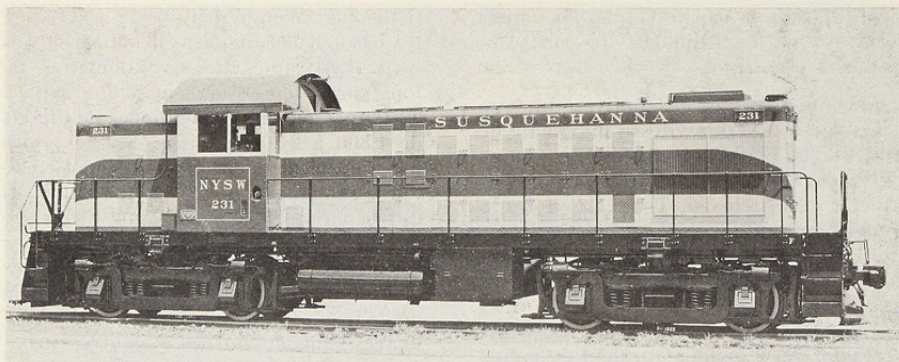


FIG. 4. — Locomotive diesel de 13 500 CV (type 1942)

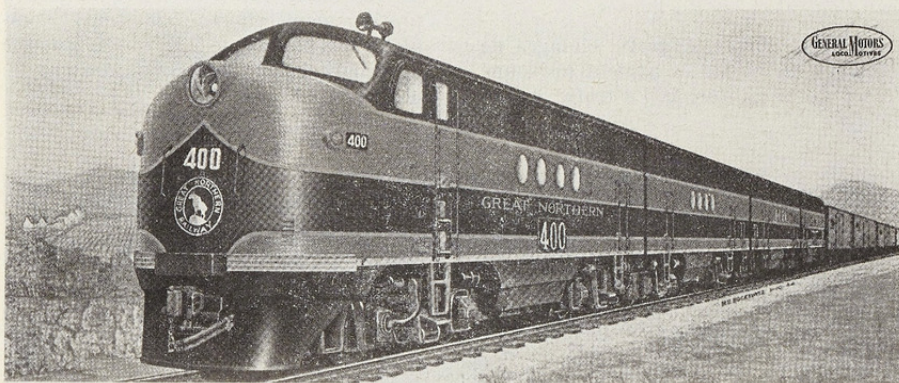


FIG. 5. — Ensemble de 4 locomotives BB diesel de 5 400 chevaux pour rames marchandises transcontinentales (type 1944).

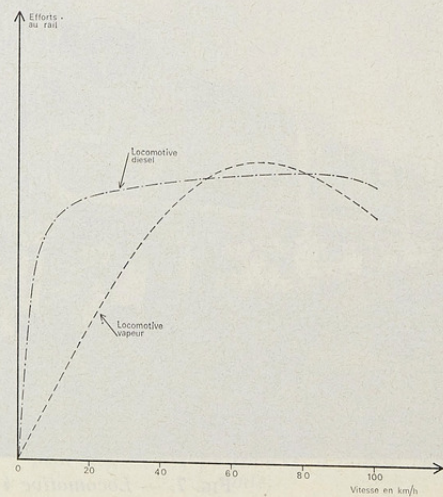


FIG. 6. — Caractéristiques effort-vitesse — types de locomotives vapeur et diesel.

nes à 27 km/h, sauvant ainsi les sabots de frein et les bandages de roues du matériel remorqué.

Certaines de ces locomotives du type C.C., capables d'une vitesse maximale de 160 km/h, étaient destinées aux trains de voyageurs, tels le fameux « Super Chief » de l'Atchison, Topeka and Santa Fe reliant Chicago à Los Angeles (fig. 7) ; mais elles avaient besoin du renfort de 2 locomotives à vapeur pour gravir, à vitesse convenable, les rampes des Rocheuses. Au total, du fait des seuls obstacles, les Japonais auraient eu moins de difficultés à débarquer en Californie qu'à franchir la Sierra Nevada, le Plateau Central et les Rocheuses.

Après la guerre, le trafic changea de sens, car les hostilités avaient provoqué l'essor de la Californie. Le trafic, essen-

tiellement commercial, est assuré en trains de 6 000 tonnes, soit 80 à 100 wagons. Ces rames de 1,5 kilomètres de long sont remorquées par des B.B. à 27 tonnes par essieu, équipées de diesels de 1 800 à 2 200 chevaux. Sur les voies du Southern Pacific, par exemple, de telles rames gravissent les 2 200 mètres qui séparent la baie de San Francisco de la crête de la Sierra Nevada (fig. 8) ; en 5 à 6 heures, elles parcourent les 150 kilomètres dont 30 sont en rampe de 24 ‰ et 85 en rampe de 18 ; 47 kilomètres sont en courbes et contrecourbes continuelles de rayon descendant souvent à 175 mètres ; durant ces 47 kilomètres, cette rame de 1 500 mètres a pratiquement effectué 28 tours complets sur elle-même ; il va de soi que de nombreux tunnels agrémentent le parcours.



FIG. 7. — Locomotive 4 CC du « Super-Chief ».



FIG. 8. — La Sierra Nevada vue de la côte du Pacifique.

Les locomotives sont réparties à raison de 5 ou 6 à l'avant, 2 ou 3 au milieu, 2 ou 3 en queue. La raison de cette répartition est double ;

- tout d'abord, éviter de soumettre les attelages à des efforts de traction inutilement intenses et, en courbe, ne pas provoquer sur la voie des efforts de ripage trop importants ;
- ensuite faire en sorte que, sous les tunnels, les dernières locomotives ne soient pas alimentées avec de l'air trop échauffé par de trop nombreux passages dans les locomotives précédentes. Faute de quoi la charge thermique des structures diesels augmenterait, tant du fait de l'accroissement du niveau thermique de la combustion (fig. 9) (déjà obérée par l'altitude) que de l'insuffisance de la réfrigération de l'eau de refroidissement.

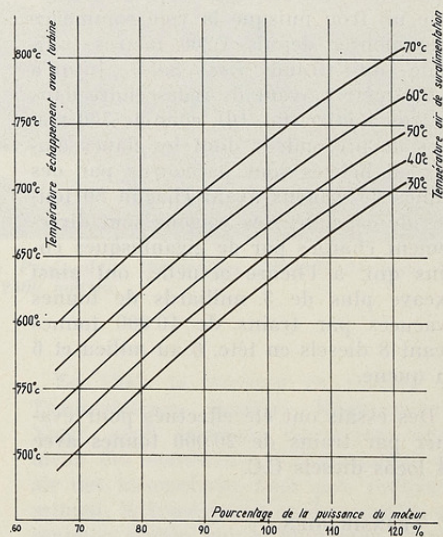


FIG. 9. — Température des gaz d'échappement en fonction de la température d'air pour différentes puissances, à vitesse constante.

Par ailleurs, pour limiter les usures des boudins de roues et de rails, les courbes les plus serrées sont munies de graisseurs de rails, ce qui provoquerait de splendides patinages si la transmission de puissance diesel — du fait qu'elle est électrique — n'était équipée de dispositifs spéciaux.

Sur de telles voies, il est exclu de s'arrêter ; tout démarrage est, en effet, impossible du fait des rampes, des courbes et contrecourbes avec graisseurs de rails, des tunnels freinant l'échappement diesel et, surtout, du taux d'échauffement des transmissions. Si une ou deux des 10 à 12 locomotives défaille, le train ralentit jusqu'au moment où le train suivant vient en renfort. Il n'y a pas eu, à ma connaissance, de cas où plus de trois rames aient dû ainsi conjuguer leurs efforts.

Le vaste plateau central s'est avéré d'une extraordinaire richesse minière, surtout dans l'Utah. Ainsi, quelque peu au sud de la charmante ville de Salt Lake City, à Bingham, se trouve une mine de cuivre à ciel ouvert : c'est, à vrai dire, une montagne qui est devenue un trou puisque la voie commence par monter depuis 1 200 mètres (altitude du Grand Lac Salé) jusqu'à 2 400 mètres avant de redescendre dans le trou minier (fig. 10), cône de 700 mètres de profondeur dont les flancs étagés en hélices sont parcourus par des rames de wagons ayant chacun 80 tonnes de capacité. Ces wagons sont directement chargés par de gigantesques engins qui, à l'heure actuelle, ont ainsi excavé plus de 3 milliards de tonnes évacuées par trains de 10 000 tonnes ayant 8 diesels en tête, 6 au milieu et 6 en queue.

Des essais ont été effectués pour évacuer par trains de 20 000 tonnes avec 34 locos diesels C.C.

2° TRANSIRANIEN.

La maîtrise de telles difficultés et la pratique continue de telles performances mirent les Américains à même d'as-

surer, en 1943, après la conférence de Téhéran, la desserte d'une ligne particulièrement inhospitalière : le Transiranien.

Cette ligne à voie unique part de Bendar Shapour, port du Golfe Persique, passe auprès de l'antique Suse, franchit à 2 100 mètres la chaîne du Zagros (qui culmine à 5 000) puis, par la région d'Hamadan, l'ancienne Echlatane, descend jusqu'à Téhéran, capitale qui s'étagé entre 1 100 mètres (la gare) et 1 600 mètres, à 1 300 kilomètres du point de départ. Ensuite, cette ligne repart vers le nord, franchit la chaîne de l'Elbourz à 2 600 mètres au pied des 5 628 mètres du Demavend avant de s'écrouler vers Bendarchach à — 20 mètres sur la Caspienne.

Les rampes atteignent 28 ‰ avec courbes de 220 mètres de rayon ; la ligne comporte 226 tunnels de 84 kilomètres de long au total et 772 viaducs totalisant 20 kilomètres.

Par les rampes et les courbes, le tracé du Transiranien s'apparente donc à celui du Southern Pacific, mais les conditions climatiques iraniennes sont beaucoup plus dures puisque, l'été, la température monte à 50 degrés à l'ombre pendant plusieurs semaines, même à 1 500 mètres d'altitude et que l'hiver elle descend couramment au-dessous de — 20 °C, sauf aux extrémités. Par surcroît, cette ligne, durant les 9/10^e de son parcours, traverse des déserts de sable qui posent de sérieux problèmes de filtration d'air tant pour les diesels que pour les transmissions. Pour éviter les entrées de sable dans la caisse, les C.C. de 3 300 chevaux 16 cylindres, livrées après 1960, furent à caisse pressurisée.

Les constructeurs européens n'avaient pas l'expérience de telles conditions de traction. Ils avaient bien maîtrisé les difficultés inhérentes au franchissement des Alpes mais en préférant forer de longs tunnels — dont certains avec une épaisseur de voûte supérieure à 2 000 mètres — plutôt que de développer de longues et fortes rampes sinueuses.

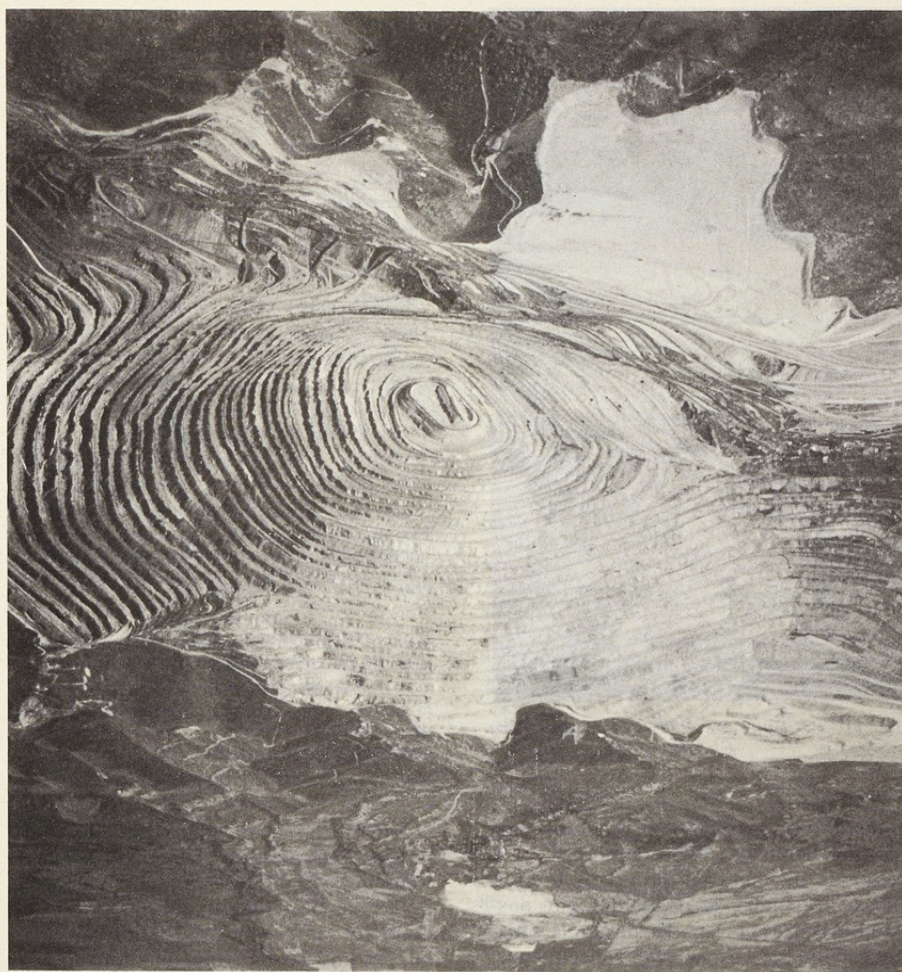


FIG. 10. — Mine de cuivre de Bingham (Utah). Profondeur 700 mètres. Altitude du bord de l'entonnoir 2400 mètres.

3° RÉGIONS DÉSERTIQUES — PROBLÈMES DE FILTRATION.

Les constructeurs français avaient, eux, l'expérience des sujétions de filtration d'air. En effet, les autorails De Dietrich en service sur Biskra-Touggourt possédaient, dès 1938, une caisse pressurisée pour empêcher les entrées de sable.

En 1942, la décision de réaliser le Transsaharien, baptisé Méditerranée-Niger, avait impliqué de sérieux examens des conditions d'alimentation en air des locomotives, bien que, judicieusement, le tracé prévu se développât, en majeure partie, sur la hammada. Néanmoins, les grandes dunes de 200 mètres de haut du Grand Erg Occidental et de l'Erg Chech (fig. 11) ne sont pas loin

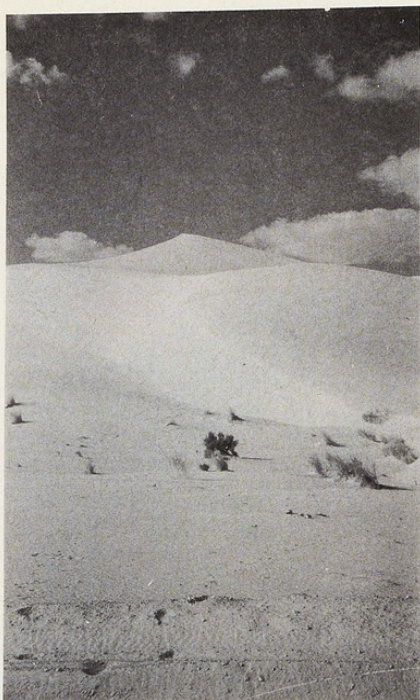


FIG. 11. — Dune de 200 mètres de l'Erg Chech.

et des vents puissants, présentant parfois un front de 200 kilomètres, sont fréquents de mars en juin ; or, le pouvoir de transport de particules que possède un vent donné croît comme la puissance 6 de sa vitesse. En conséquence, par grand vent saharien, la visibilité au sol est pratiquement nulle tandis que des grains de 25 microns sont soulevés jusqu'à 2 000 mètres d'altitude. La situation est d'autant plus préoccupante que le sable saharien possède un remarquable pouvoir d'érosion du fait de la teneur en quartz (fig. 12).

A 4 mètres au-dessus du sol, hauteur des prises d'air des locomotives, chaque mètre cube d'air véhicule jusqu'à 50 grammes de sable, soit 10 fois plus que n'en possède l'air calme du niveau du sol au voisinage de nos cimenteries

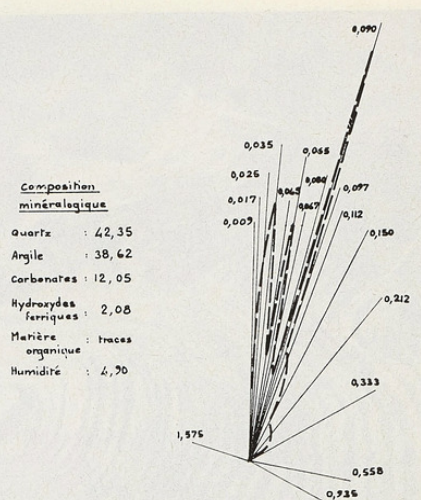


FIG. 12. — Echantillon prélevé aux confins occidentaux du grand erg occidental (à 3 mètres de hauteur par vents de 70 km/heure).

a) chaque nombre affecté à un rayon polaire exprime la dimension, en millimètre, du diamètre moyen des particules ;

b) les aires des secteurs délimités par la courbe sont proportionnelles aux masses de sédiments relatives aux dimensions considérées.

et 50 fois plus que dans des chantiers de travaux publics ordinaires. A cette hauteur de 4 mètres, par vent de 70 km/h, ne montent que les grains de diamètre inférieur à 70 microns, ce qui est une raison supplémentaire pour :

1° prendre l'air aussi haut que possible, ce qu'ont parfaitement compris le chameau et la girafe ;

2° rassembler les locomotives en tête, afin de les soustraire au sable soulevé par le déplacement du train.

La filtration à mettre en œuvre dépend du taux de concentration en sable.

Tout d'abord, il faut adopter des dispositions particulières pour que soient éliminées les 3 ou 4 tonnes de sable qu'absorberait, en une heure, une loco-

motive de 2 500 chevaux. On peut, par exemple, comme cela fut fait sur les locomotives des mines de charbon de Kenadza, près de Colomb-Bechar, mettre en œuvre, en premier étage, une épuration centrifuge qu'on a intérêt à choisir dynamique afin qu'elle ne soit en service que lors des vents de sable (une centrifugation statique crée une perte de charge permanente) et qu'elle soit efficace, même au ralenti diesel.

En second étage, une filtration proprement dite arrête les grains inférieurs à 30 microns. Ceci étant, il faut fixer le seuil de filtration ; ce seuil de filtration doit être d'autant plus bas que la masse véhiculée par l'air est plus élevée. En effet, le taux d'usure des segments de tête du diesel que provoque un milligramme de poussière varie en fonction des dimensions de ces poussières conformément à la courbe présentée en figure 13. On en conclut que si avec de faibles concentrations, en France par exemple, il suffit d'empêcher l'introduction de poussières supérieures à 10 microns, au Sahara il faut abaisser ce seuil à 5 microns.

Soulignons que, dans le cas d'un diesel, ces problèmes de filtration d'air rel-

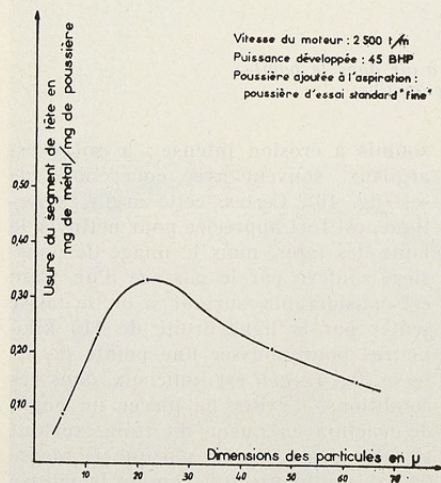


FIG. 13. — Usure de l'alesage en fonction des dimensions de particules.

quièrent une attention beaucoup plus diligente que dans le cas d'un moteur à essence avec carburateur. Si, dans ce dernier cas, le filtre se colmate, le débit d'air diminue, ce qui entraîne la diminution du débit d'essence ; le moteur perd donc de la puissance, ce qui est désagréable mais, au demeurant, peu grave. Dans le cas du diesel, à moins de dispositifs spéciaux, le débit de gas-oil est indépendant du débit d'air ; en cas de colmatage, la combustion est donc obérée ce qui se traduit, en premier étage, par de nauséabondes fumées noires à l'échappement, puis, ensuite, par un grippage de piston généralement suivi par une perforation de carter, ce qui est vraiment très déplaisant.

Il importe donc, d'adopter un filtre capable de retenir une quantité importante de poussière avant d'amorcer l'accroissement rapide de perte de charge (fig. 14), c'est-à-dire un filtre épais et perméable en prévoyant un démontage aisé du média filtrant afin de faciliter les opérations périodiques d'entretien (fig. 15).

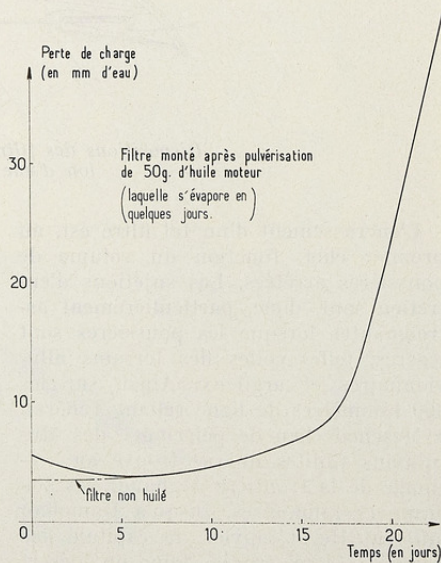


FIG. 14. — Evolution de la perte de charge d'un filtre à air en fonction du temps.

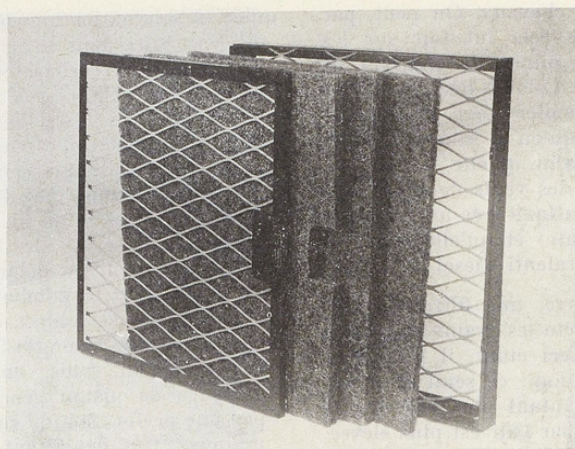
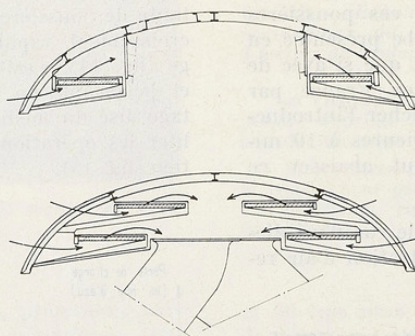


FIG. 15. — Filtre à air à panneau démontable.



Dispositions des filtres à air dans le pavillon d'une locomotive.

L'encrassement d'un tel filtre est, au premier chef, fonction du volume de poussières arrêtées. Les sujétions d'entretien sont, donc, particulièrement astreignantes lorsque les poussières sont légères, telles celles des terrains alluvionnaires et argileux. Ainsi, sur les 900 kilomètres de ligne reliant Téhéran à Mesched (lieu de pèlerinage des Musulmans Chiites qui se trouve au voisinage de la frontière Afghane), les 300 premiers kilomètres, jusqu'à Damghan (qui fut Hecatompyles, la capitale des Parthes), sont tracés dans un désert sablonneux, type saharien. Au-delà, on se trouve en plein terrain alluvionnaire

soumis à érosion intense ; le sol y est argileux, souvent avec concrétions de sel (fig. 16). Certes, cette argile, smectique, est fort appréciée pour nettoyer la laine des tapis, mais le nuage de poussière soulevé par le passage d'un train est considérable, surtout si on se laisse tenter par la ligne droite de 115 kilomètres pour pousser une pointe de vitesse (fig. 17) ; il est judicieux, dans ces conditions, d'éviter de placer un engin de traction en queue du train, surtout si celui-ci est rapide, puisque la masse de sable soulevé croît comme la vitesse à la puissance 6.



FIG. 16. — *Le désert salé iranien.*

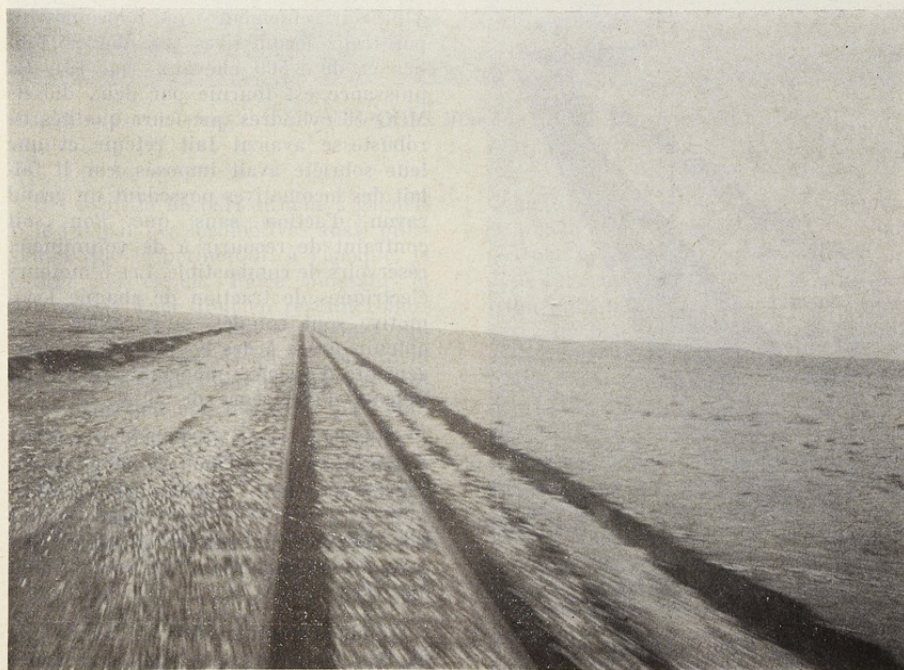


FIG. 17. — *La grande ligne droite de 115 kilomètres de la ligne Téhéran-Meshed.*

4° MAURITANIE.

De telles difficultés de filtration furent maîtrisées lors de la sortie, en 1961, des locomotives Alsthom destinées à la remorque des rames de 14 000 tonnes acheminant jusqu'à Port-Etienne le minerai de fer saharien (fig. 18).

Les considérations économiques qui fixèrent les principes de base de l'exploitation de cette ligne de 650 kilomètres firent abandonner, tout comme vingt ans auparavant pour le Transsaharien, le type traditionnel de chemin de fer africain que les Français avaient pratiqué jusqu'alors.

Jusqu'alors, en effet, le problème avait été d'établir une ligne de pénétration

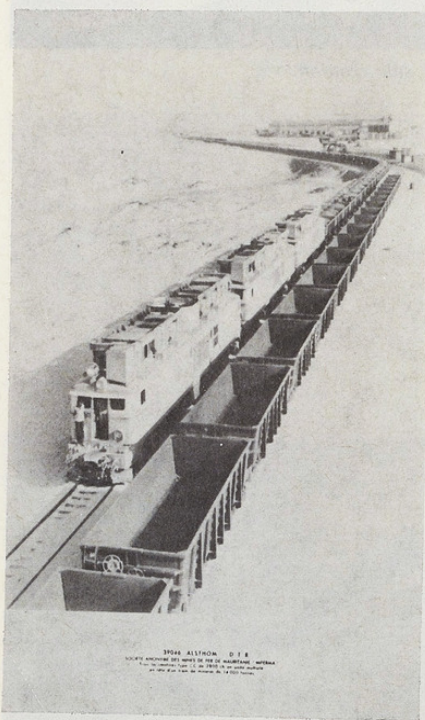


FIG. 18. — Le train de 14 000 tonnes des Mines de Fer de Mauritanie (document Alsthom).

destinée à un modeste trafic de voyageurs et de denrées vivrières. Il ne pouvait désormais être question de voies qui, du fait de leur écartement métrique, ne pouvaient admettre que des charges par essieu modestes et qui, établies avec des moyens matériels nécessairement limités, devaient s'adapter à des topographies souvent ingrates en recourant à des courbes de très faibles rayons. Il fallait, maintenant, prévoir :

- des trains de poids unitaire élevé afin d'en limiter le nombre ;
- des voies admettant des charges par essieu d'au moins 25 tonnes afin d'utiliser des wagons dont le faible rapport tare/charge utile assure une bonne rentabilité.

Le site mauritanien se prêtait, volontiers, il faut le reconnaître, à des voies peu tortueuses et à rampes faibles (5 ‰ dans le sens des trains chargés). Ainsi, des efforts de traction ne dépassant pas 100 tonnes suffisaient, ce qui conduisit à prévoir seulement 3 ou 4 locomotives par train, locomotives C.C. de 126 tonnes et de 2 500 chevaux (fig. 19). La puissance est fournie par deux diesels MGO 16 cylindres que leurs qualités de robustesse avaient fait retenir et que leur sobriété avait imposés, car il fallait des locomotives possédant un grand rayon d'action sans que l'on soit contraint de recourir à de volumineux réservoirs de combustible. Les 6 moteurs électriques de traction de chaque locomotive sont couplés en parallèle pour obtenir, grâce à des bogies sans déchargements d'essieux importants, des coefficients d'adhérence de 30 %.

Ainsi, une rame de 14 000 tonnes est acheminée à 50 kilomètres en palier, la consommation de combustible s'établissant à 2 grammes par tonne et par kilomètre, ce qui constituait, et est encore, à ma connaissance, le record mondial d'économie.

C'était la première fois au monde que de tels trains n'étaient pas remorqués par locomotive américaine.

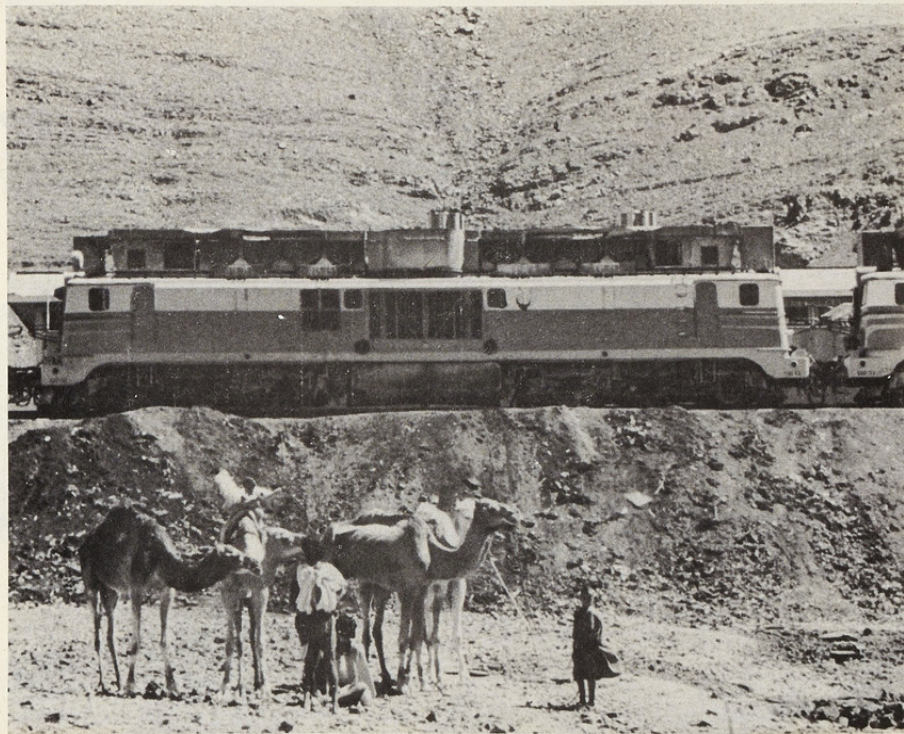


Fig. 19. — Locomotive CC, 2 500 chevaux des Mines de Fer de Mauritanie (document Alsthom).

Il y avait là un pari difficile à gagner. Il le fut par des locomotives aussi puissantes que le permettait, à l'époque, la charge par essieu. Faire puissant et néanmoins léger, tout en restant robuste, est nécessaire pour d'évidentes raisons économiques, lesquelles n'avaient pas toujours été bien perçues par certains constructeurs, tels celui qui s'était lancé, en 1945, dans la construction de locomotives de 3 000 chevaux du type 2 DD 2 (fig. 20), à trente tonnes par essieu, équipées de diesels tournant à 625 tours par minute et pesant 15 kg par cheval.

5° CONGO OCÉAN.

En Mauritanie, on était très loin des conditions d'exploitation de la ligne

Congo Océan et de sa voie à écartement de 1,067 mètre n'admettant que des charges par essieu de 16 tonnes, ce qui est déjà remarquable pour de la voie métrique. La nécessité d'accroître le trafic sur cette ligne à voie unique ne pouvait se traduire que par un accroissement du tonnage des trains, donc de la puissance de la locomotive. Compte tenu des contingences, il fallait 3 600 chevaux et 8 essieux moteurs. Ceci étant, il fallait les faire passer dans des courbes de 50 mètres de rayon, ce qui n'est pas une mince affaire ; ces impératifs conduisirent à une locomotive équipée d'un diesel AGO 16 cylindres (fig. 21), dont la caisse repose sur 4 bogies à 2 essieux (fig. 22). Cette locomotive est une performance technique de tout premier ordre qui souscrit à des impéra-



FIG. 20. — Locomotive 3 000 chevaux, type 2 DD 2, à 30 tonnes par essieu.

tifs d'une extrême difficulté, mais il faut convenir que de tels prodiges ne sont absolument pas compétitifs au niveau de la concurrence internationale.

6° PROBLÈMES DE REFROIDISSEMENT.

Les températures sahariennes, iraniennes, mauritaniennes et congolaises imposent des précautions particulières au point de vue refroidissement du diesel.

Il faut, avant tout, maintenir suffisamment basse la température de l'huile diesel pour éviter qu'une perte de viscosité trop importante n'ait pour conséquence de réduire les épaisseurs des coins d'huile à une valeur telle qu'elle ne puisse plus s'opposer aux contacts directs entre coussinets et vilebrequin et, en général, entre les surfaces des pièces se déplaçant sous charge.

Nous ignorons si le maintien du niveau thermique de l'huile par un réfrigérateur de type domestique, tel que prévu en 1942 pour les locomotives sahariennes, aurait été satisfaisant.

Ce que nous savons, c'est que, dans le dispositif habituel où l'huile est refroidie par l'eau, elle-même refroidie par de l'air à 50 °C, il est indispensable d'adopter la solution de deux circuits indépendants, à savoir :

- un circuit, dit Basse Température, évacuant les 100 kilocalories par cheval et par heure que doit céder l'huile et assurant par surcroît le refroidissement de l'air de suralimentation, à 70 °C si possible ;
- un circuit, dit Haute Température, limitant les températures des

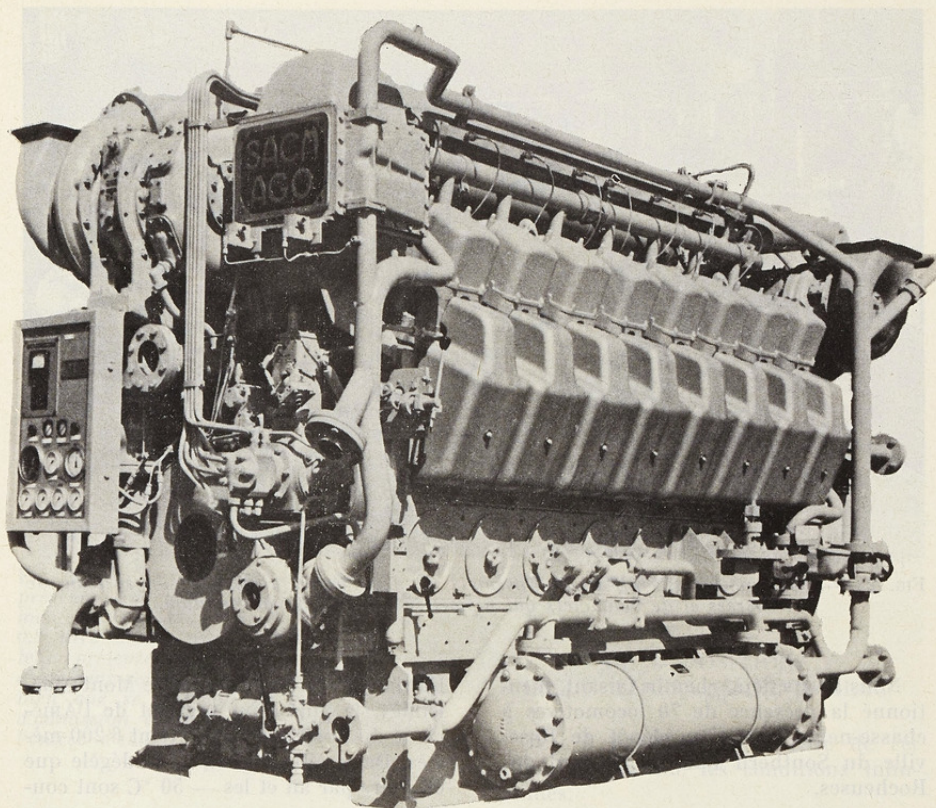


FIG. 21. — Moteur AGO 16 cylindres développant 4 000 chevaux à 1 350 tours/minute en condition climatique normale. (document Société Alsacienne de Construction Mécanique Mulhouse).

structures du moteur en évacuant, suivant le type de ce dernier, entre 200 et 350 kilocalories par cheval et par heure.

La mise sous pression de l'eau de ce deuxième circuit permet de diminuer le volume des radiateurs puisqu'on peut élever ainsi la température de l'eau, donc accroître l'écart avec celle de l'air ambiant, sans risquer la formation de poches de vapeur, génératrices, par ailleurs, de consommations d'eau élevées, ce qui peut être très ennuyeux en plein désert.

Quoi qu'il en soit, le débit de la pompe d'eau doit être tel que, au régime nominal, l'échauffement de l'eau dans le moteur ne dépasse pas 5 °C, ce qui conduit, en première analyse, à des débits de 1 litre par cheval et par minute. La pompe à eau étant du type cinétique, ce débit est fonction de la perte de charge du circuit.

7° RÉGIONS ARCTIQUES.

Les responsables des trains miniers du Grand Nord ont des préoccupations d'une autre nature.

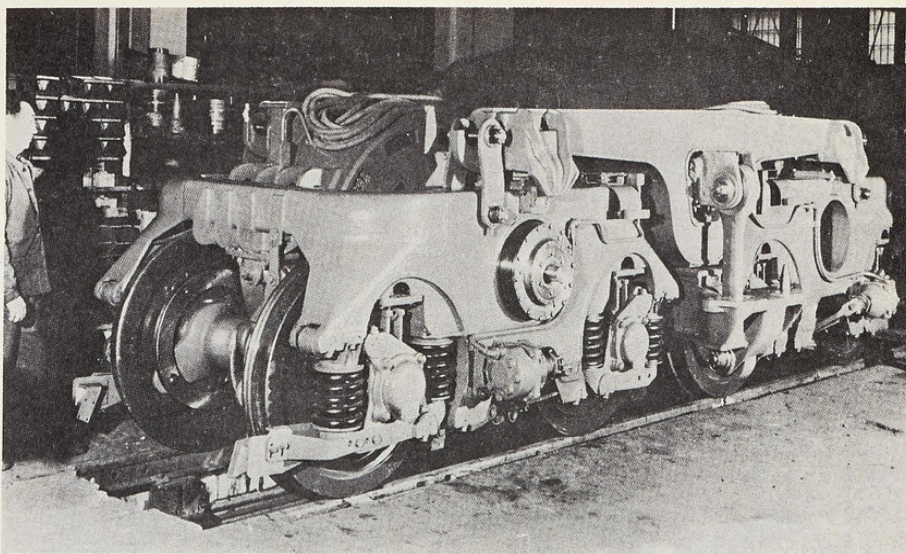


Fig. 23. — Locomotive BB BB CEM. Ensemble de deux bogies reliés par un système de traverses et de balanciers qui permettent une double articulation.

Nous avons déjà, chemin faisant, mentionné la présence de 70 locomotives à chasse-neige rotatif au dépôt de Roseville du Southern Pacific, au pied des Rocheuses.

De telles dotations sont encore plus nécessaires pour le Northern Pacific et le Great Northern dont les voies se développent, 1 500 kilomètres plus au nord, entre d'interminables murs de neige de 4 mètres de hauteur, durant de longs mois d'hiver, le long des flancs nord du Mont Rainier, volcan qui culmine à 4 400 mètres.

Le problème est alors de maintenir les températures d'eau, d'huile et de gasoil durant les longues descentes, étant entendu que l'on n'arrête jamais les diesels, car il serait hors de question de pouvoir les relancer.

Ainsi, derechef, les Américains étaient bien armés pour assurer le trafic en Alaska, au voisinage du cercle polaire arctique, sur les 500 kilomètres séparant le port d'Anchorage et la ville de

Fairbanks, en contournant le Mont MacKinley, le plus haut sommet de l'Amérique du Nord puisqu'il atteint 6 200 mètres. Dans cette région, il ne dégèle que 60 jours par an et les -50°C sont courants.

Pour éviter le gel de l'eau, on lui adjoint, bien sûr, de l'éthylène glycol, lequel a pour mission d'abaisser le point de congélation du mélange mais aussi, et peut-être surtout, qui évite que le mélange n'augmente de volume si, malgré tout, il gèle.

Mais cet éthylène glycol doit être utilisé avec circonscription car il ne faut pas perdre de vue que, du fait de la diminution du coefficient d'échange thermique paroi-eau, les températures des structures du diesel croissent et que cet accroissement est d'autant plus important que la température de départ est plus élevée (Fig. 23).

Lorsqu'on évoque de telles conditions de trafic arctique, on ne peut pas ne pas mentionner la fameuse ligne du Labra-

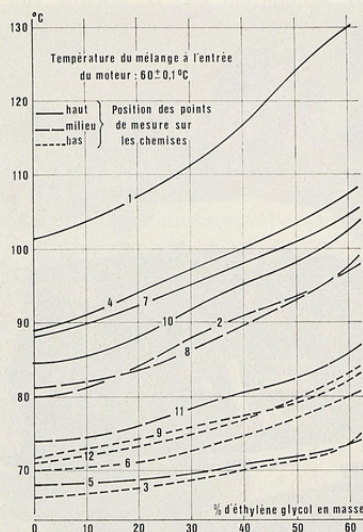


Fig. 23. — Température des chemises en présence de glycol. Moteur diesel suralimenté à injection directe. Débit d'eau : 0,8 litre/cheval/minute. Quantité de chaleur prélevée : 4,75 kg cal./s. Chemise d'eau sans collerette ni jaquette. Le point 1, bien que se trouvant du côté « soupape d'admission est mal placé par rapport à l'entrée d'eau (ébullition locale probable).

dor qui relie la rive gauche de l'estuaire du Saint-Laurent à la mine de fer du Knob-Lake par des trains de 15 000 tonnes. A vrai dire, ce service ne me paraît pas extraordinaire ; en effet, le minerai de fer ne pouvant être manutentionné en hiver, le trafic n'est assuré qu'entre mai et octobre.

J'attache personnellement beaucoup plus d'intérêt aux performances réalisées en Chine par les 50 locomotives françaises C.C. Alsthom à moteur AGO 16 cylindres de 3 650 chevaux (Fig. 24). Les ambiances extrêmes y sont, en effet, + 40 °C l'été et - 40 °C l'hiver. La charge par essieu, limitée à 23 tonnes, permet néanmoins, grâce aux bonnes conditions d'adhérence, de remorquer des trains de marchandise lourds, dont la charge varie en fonction du profil des lignes desservies qui rayonnent dans les

régions montagneuses entourant Pékin. Ces locomotives possèdent un équipement de freinage rhéostatique permettant un effort de retenue de 31 tonnes à 35 km/h et un équipement de maintien de la température de l'eau capable de 100 000 kilocalories par heure, ce qui permet, très judicieusement, un emploi modéré d'antigel.

On remarquera l'évolution des techniques survenues en 10 ans ; alors que les C.C. mauritaniennes de 138 tonnes ne possédaient que 2 500 chevaux en deux diesels, soit 18 chevaux par tonne, les C.C. chinoises de même masse possèdent, en un seul diesel, 3 650 chevaux, soit 26 chevaux/tonne.

Le gain de masse est dû tant aux progrès technologiques du diesel qu'au fait de l'adoption d'une transmission électrique triphasé/continu autorisée par l'apparition des redresseurs secs.

III. — POSITIONS TECHNOLOGIQUES GÉNÉRALES.

C'est à dessein que le titre de cet exposé mentionne les conditions inhumaines.

En effet, les fonctions vitales du diesel et celles de l'homme sont, toutes deux, basées sur un phénomène de combustion au cours duquel, grâce à l'air atmosphérique, le potentiel énergétique contenu dans des éléments d'apport possédant un certain pouvoir calorifique est transformé en travail.

Dans les deux cas, le rendement de la transformation énergétique dépend de la qualité de la combustion, tributaire des caractéristiques physico-chimiques de l'air et des aliments ; dans les deux cas, la pérennité de l'état vital dépend de la bonne évacuation des déchets.

1° LE DIESEL.

On se doit de reconnaître la remarquable faculté d'adaptation du diesel à faire face à des conditions de fonctionnement



FIG. 24. — Locomotive diesel CC 3 650 chevaux, en service sur les chemins de fer chinois (document Alsthom).

aussi disparates que celles que nous avons présentées.

Il faut tout d'abord, acter que ces diesels puissants possèdent, du fait de la suralimentation, un dispositif maintenant la température de l'air au voisinage de 70 °C. Une telle régulation met le diesel à l'abri de températures de combustion anormalement élevées, préjudiciables aux structures du moteur et de la turbine du turbo-compresseur. Rappelons (comme déjà mentionné en Fig. 9) que toute élévation de 10 °C de la température de l'air admis provoque une augmentation d'au moins 25 °C de la température des gaz de combustion.

Par ailleurs, la présence d'un turbo-compresseur pallie, dans une certaine mesure, les effets de la perte de densité de l'air due à l'altitude. En effet, le taux de détente des gaz d'échappement traversant

la turbine de suralimentation croît au fur et à mesure que la pression de l'air ambiant diminue ; la vitesse de rotation de la turbine augmente donc avec l'altitude, entraînant l'augmentation de vitesse du compresseur. Ainsi, le volume d'air aspiré par unité de temps croît, ce qui compense partiellement la perte de densité due à l'altitude. Pratiquement, un diesel suralimenté conserve jusqu'à 1 000 mètres d'altitude la puissance qu'il développait au niveau de la mer, mais la température des gaz sortie culasses a augmenté et la vitesse de rotation du turbo-compresseur s'est accrue.

Toutes ces belles dispositions s'évanouissent lorsqu'on parcourt un tunnel, surtout s'il est en voie unique ; les proches parois du tunnel introduisent, en effet, une contre-pression à l'échappement turbine.

Par ailleurs, si l'on marche en unités multiples, les locomotives suiveuses absorbent de l'air réchauffé par le passage dans le diesel de tête et dans ses radiateurs ; la situation, se dégrade, donc, successivement.

Il est un fait que lorsqu'une locomotive sort d'un tunnel, on a l'impression qu'elle recouvre une nouvelle santé ; en tout cas, on enregistre, au dynamomètre, une augmentation instantanée de l'effort au crochet.

A vrai dire, ce à quoi un diesel est, en service, le plus sensible, est :

1° comme nous l'avons déjà évoqué, l'encrassement exagéré du filtre à air ;

2° la qualité de l'huile. Celle-ci est officiellement déterminée par sa viscosité cinématique (écoulement dans un tube capillaire) et ses propriétés physico-chimiques à l'état neuf. Or, on perd trop souvent de vue que le facteur essentiel de l'huile est une propriété d'essence mécanique : elle est la viscosité dynamique qui fixe l'épaisseur du film d'huile assurant qu'en aucune circonstance il n'y aura contact entre les pièces en regard se déplaçant sous charge ;

3° la température du combustible. La pompe d'injection introduit dans le cylindre un certain volume de combustible à chaque cycle ; or, le couple moteur produit est fonction de la masse de combustible injectée. En conséquence, la puissance du moteur et sa consommation volumétrique par cheval/heure sont directement influencées par la température du combustible, dont le coefficient de dilatation volumétrique est 5 fois supérieur à celui de l'eau.

Ces considérations, au demeurant secondaires, étant énoncées, il apparaît évident que le problème dominant incombe au constructeur dieseliste qui ne doit présenter, surtout à l'exportation, que des types de moteurs aux structures pratiquement indéformables et d'entretien facile, types de moteurs qui doivent avoir, dans leur pays d'origine,

épuisé toutes leurs maladies de jeunesse avant d'avoir manifesté le plus petit symptôme de maladie de vieillesse.

Dans ces conditions, la qualité du service assurée par ces moteurs dépendra du Service après-vente, c'est-à-dire, évidemment, du stock de pièces de rechange, mais surtout de la formation du personnel local, car l'homme tant soit peu présomptueux s'avère plus dangereux que la nature la plus hostile.

Finalement, la vulnérabilité du diesel face à des interventions humaines inopportunes est le plus répréhensible de ses défauts. D'aucuns professent : « Il ne meurt pas, on le tue. » « On », c'est souvent l'homme ; c'est parfois la transmission.

2° TRANSMISSIONS DE PUISSANCE.

2-1. *Transmissions conventionnelles.*

La vue du passage de l'un de ces trains lourds en forte rampe provoque généralement votre compassion aux souffrances du diesel.

Or, lorsque les qualités fondamentales de la transmission de puissance sont respectées, le diesel fonctionne, alors, à son origine nominal, c'est-à-dire à pleine puissance, certes, mais sous plein débit d'air, d'eau et d'huile ; il ne souffre donc pas exagérément.

En réalité, c'est alors la transmission qui souffre puisqu'elle fonctionne, dans ces conditions, sous pleine puissance et à faible vitesse, c'est-à-dire sous couple très élevé.

Il ne messied peut-être pas de rappeler qu'une transmission de puissance, c'est-à-dire du produit d'une vitesse de rotation par un couple, doit, fondamentalement, assumer deux fonctions distinctes :

- une variation de vitesse d'une part ;
- une conversion de couple d'autre part.

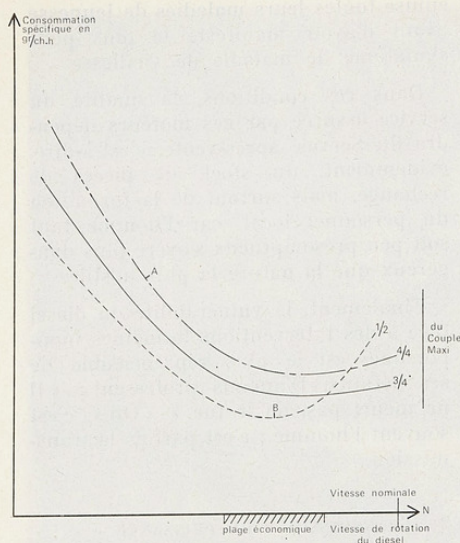


FIG. 25. — Courbes types de consommation spécifique pour un moteur diesel. Il est préférable de fonctionner en B à vitesse importante et faible couple qu'en A à vitesse faible, plein couple.

Elle doit, en conséquence, pour une puissance diesel donnée, moduler le produit (couple/vitesse) fourni à la roue, c'est-à-dire ne pas asservir la vitesse diesel à la vitesse roue, car il s'agit, en l'occurrence, de transmettre une puissance et non pas de transmettre un mouvement. Ces deux fonctions, caractéristiques d'une transmission de puissance, sont parfaitement assumées par la transmission électrique à régulation externe.

Dans ce cas, en effet, le transfert de puissance entre diesel et générateur électrique est sous la dépendance d'un régulateur de vitesse, tandis que le transfert entre générateur et moteur électrique est sous la dépendance d'un régulateur de tension. Le premier détecte toute variation de vitesse diesel et corrige, en conséquence, le couple développé par celui-ci par action sur le taux de combustible injecté ; le second régulateur, lié au premier, détecte toute variation de tension, c'est-à-dire de vi-

tesse roue, et corrige, en conséquence, le couple demandé par le générateur en agissant sur son taux d'excitation.

Ainsi le conducteur de la locomotive peut imposer une vitesse de rotation diesel située dans la plage de fonctionnement économique, ce qui a pour effet (fig. 25) :

- de diminuer la consommation de combustible et, par conséquent, la pollution atmosphérique ;
- de faire fonctionner le diesel à une allure où il respire à l'aise, n'échauffe pas trop ses structures, produit peu de déchets.

Ces impératifs fondamentaux auxquels doit souscrire toute transmission de puissance ne sont pas suffisamment respectés par la transmission hydrocinétique. Le principe fonctionnel de cette rivale de la transmission électrique exclut toute possibilité de régulation ; comme toute machine cinétique (turbine, pompe à eau, hélice...), elle opère une conversion de couple en asservissant la vitesse de rotation diesel à la valeur du couple fourni à la roue. Des dispositions technologiques pertinentes permettent, certes, de tempérer les conséquences de cette imperfection au prix d'organes supplémentaires ; néanmoins, bien que le rendement intrinsèque de la transmission électrique soit inférieur à celui de la transmission par convertisseur hydraulique, le rendement énergétique global de l'ensemble motopropulseur fait apparaître un avantage incontestable pour la transmission électrique réglable.

Par ailleurs, la transmission hydrocinétique, du fait de l'absence de possibilité de régulation, interdit toute action en cas de patinage des roues motrices, patinage qui, les cheminots le savent bien, est la plaie de la traction ferroviaire, et pas seulement lors du démarrage des trains. Puisque lorsque les roues patinent (phénomène identique à une hélice qui déjauge), on ne peut

envisager de vidanger l'huile du convertisseur, il faut donc couper l'injection diesel puis, une fois opéré le raccrochage entre roue et rail, remettre le diesel en puissance.

Si les risques de patinage sont continus, il faut limiter, une fois pour toutes, l'injection diesel. Ainsi, durant toute la montée des Montagnes Rocheuses, sur les locomotives à transmission hydraulique mises en expérimentation, la puissance du diesel devait être ramenée de 2 000 à 1 200 chevaux, c'est-à-dire qu'on était contraint de réduire la puissance au moment précis où la pleine puissance était désirable.

A vrai dire, même si tout risque de patinage avait pu être éliminé, il eût fallu, malgré tout, limiter la puissance diesel afin de juguler l'échauffement de l'huile de la transmission durant cette longue montée des Rocheuses. Il faut conserver bien présent à l'esprit que le principe fonctionnel d'une transmission hydrocinétique de puissance se résume à projeter à grande vitesse une certaine masse d'huile sur des parois mobiles afin de refouler celles-ci, la puissance transmise étant $1/2 Qm.V^2$. Il s'ensuit un échauffement de l'huile dû aux chocs et frottements d'autant plus important que la vitesse relative entre l'huile et les parois mobiles est plus grande. Lors du démarrage d'un train, cet échauffement atteint plusieurs degrés par seconde. L'emploi de telles transmissions conduit donc à faire remorquer des trains relativement légers par des locomotives relativement puissantes, puisqu'il faut pouvoir accélérer franchement, et lourdes pour ne pas risquer de patinages, faute de quoi, il faut limiter le taux d'échauffement, c'est-à-dire prévoir une grande masse d'huile par cheval développé ; ou bien, comme dans le cas des Rocheuses, réduire la puissance diesel ; ou bien, enfin, accroître la capacité du réfrigérant de l'huile qui, en service type S.N.C.F., requiert déjà l'évacuation d'une masse calorifique égale à la moitié de celle qu'évacue l'eau du diesel.

La transmission électrique est, quant à elle, le siège de pertes Joule, génératrices d'échauffements proportionnels au carré de l'intensité débitée, donc du couple appliqué à la roue. Il faut, par une ventilation appropriée, limiter les échauffements des isolants afin de leur conserver une durée de vie raisonnable. Le générateur tourne toujours vite, accouplé qu'il est au diesel : il peut donc être autoventilé. Par contre, à moins que le rapport $\frac{\text{puissance à la roue}}{\text{charge remorquée}}$ ne soit considérable (ce qui est le cas des locomotives alimentées par caténaires), les moteurs électriques doivent être refroidis par ventilation forcée. Pratiquement, on s'évertue à limiter l'échauffement à 0,1 °C par seconde.

Mais cette nécessaire ventilation :

- requiert un débit d'air généralement égal à 4 fois le débit d'air traversant le diesel ;
- absorbe de l'énergie, donc affaiblit sérieusement le rendement réel de la transmission ;
- exige que cet air soit propre ;
- provoque l'absence d'étanchéité de la transmission.

C'est le défaut d'étanchéité de la transmission électrique qui lui fait préférer la transmission à conversion hydraulique de couple dans les travaux publics, les mines, les raffineries de pétrole.

Dans le domaine ferroviaire, l'handicap reste sérieux dans les régions désertiques et polaires ; il devient grave dans le cas de voies inondables, triste privilège des pays soumis à mousson.

Envisager, pour ces régions, des bogies à moteur électrique unique, placé en superstructure est, certes, séduisant, d'autant plus qu'un tel bogie à empattement réduit s'inscrirait sans difficultés dans les courbes à faible rayon ; mais cette solution se présente économiquement mal dans une compétition inter-

nationale et, par ailleurs, du fait du débordement du moteur dans la caisse, elle provoque des contraintes élevées dans les structures de celle-ci, surchargée qu'elle est par un diesel et un réservoir à combustible.

2-2. Transmission hydrostatique.

J'en arrive à la fin de mon propos principal qui était de vous présenter les grandeurs et les servitudes des locomotives diesels devant faire front à des conditions de service inhospitalières.

Si ces conditions sont, au total, beaucoup moins agressives pour le diesel que certaines interventions humaines, elles s'avèrent, par contre, assez cruelles pour les transmissions.

Dans quelques années, Messieurs, le souvenir que vous conserverez de cet exposé motivera l'apparition d'un sourire condescendant. Des locomotives du proche avenir seront, en effet, équipées de transmission qui seront :

- étanches ;
- affranchies de sujétions d'échauffement, du fait que leur rendement propre sera très élevé sur une très large plage de vitesses (disons entre 10 et 100 % de la vitesse maximale du déplacement) ;
- justiciables d'une régulation externe simple mettant la locomotive à l'abri des patinages, permettant au diesel de fonctionner, le plus clair du temps, à son régime économique, non polluant, n'engendrant que des contraintes modérées dans les structures ;
- capables d'exercer un important effort de retenue en descente.

Ces transmissions seront hydrostatiques. Leur succès est basé sur le fait qu'elles admettent, maintenant, des pressions internes de l'ordre de 500 bars.

Dans cette technique, la puissance diesel convertie par une pompe volumé-

trique à piston est l'objet d'un transfert de forme $Qv \times P$, Qv étant le débit volume d'huile et P étant la pression engendrée par le couple résistant développé à la roue.

Une telle transmission se présente, schématiquement, comme la classique transmission électrique (fig. 26) ; la pompe hydraulique est homologue au générateur d'électricité ; le récepteur hydraulique, de même technique que la pompe, est homologue au moteur électrique ; les tuyauteries qui les relient sont homologues aux câbles. L'installation d'une telle transmission est donc, elle aussi, tout comme la transmission électrique, affranchie de tout impératif d'alignement d'axes, de toute sujétion de liaison rigide et Dieu sait combien cela est agréable.

Les pertes dues aux circulations de fluide sont proportionnelles :

- à I^2 en transmission électrique ;
- à Qv^2 en transmission hydrostatique.

Mais alors que dans la transmission électrique le couple transmis est proportionnel au débit de courant I , paramètre de circulation, dans la transmission hydrostatique le couple transmis est proportionnel à la pression hydraulique P , paramètre de potentiel homologue à la tension électrique.

Cette différence est d'importance capitale puisqu'il devient, ainsi, possible, grâce à la transmission hydrostatique, de développer de gros couples sans mettre en œuvre de gros débits Qv de fluide lesquels engendreraient des frottements élevés, des échauffements importants, des rendements médiocres.

Le succès que ne peut pas ne pas connaître la transmission hydrostatique est conditionné par la possibilité technologique de supporter de hautes pressions.

Plus élevées sont les pressions qu'admet une transmission hydrostatique en service continu, plus faible est évidem-

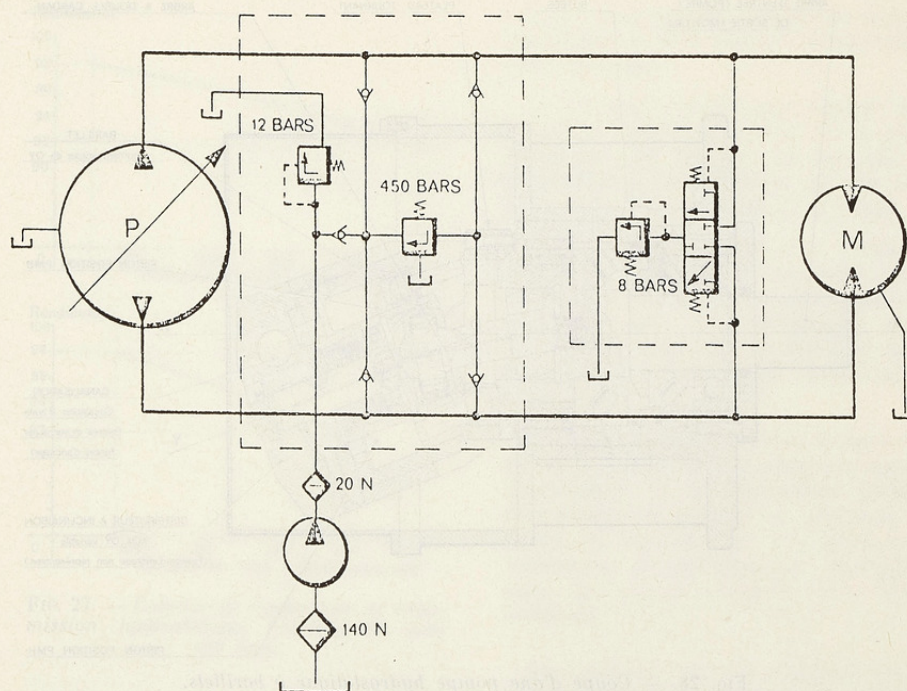


Fig. 26. — Schéma d'une transmission hydrostatique de puissance.

ment le débit d'huile requis pour transmettre une puissance donnée, donc plus élevé est le rendement.

Des transmissions hydrostatiques capables de supporter des pressions de 500 bars existent à l'heure actuelle. Pour transmettre un cheval, il leur suffit d'un débit d'un litre par minute ; leur rendement moyen est alors supérieur à 92 % (fig. 27).

Ces performances, déjà exceptionnelles, s'amélioreront en fonction de l'apparition, sur le marché industriel, d'huiles de plus en plus incompressibles, telles celles qui entourent les cerveaux des dauphins et de certains poissons des grandes profondeurs.

La pompe, directement accouplée au diesel, est une pompe à pistons disposés en barillet (fig. 28), pompe transmet-

tant un cheval par centimètre cube de cylindrée, pompe pouvant tourner très vite puisqu'elle ne comporte ni soupapes ni vilebrequin.

Les moteurs hydrauliques de même conception que la pompe possèdent, eux aussi, une masse et un encombrement faibles ; ainsi, un moteur capable de 500 chevaux ne pèse que 85 kilogrammes et se présente sous la forme d'un cylindre de 22 centimètres de diamètre et 40 centimètres de haut. On peut donc en installer facilement deux, en position « suspendu par le nez » sur un essieu et construire un bogie C de 3 000 chevaux à très faible empattement, capable de s'inscrire sans difficultés dans des courbes de l'ordre de 100 mètres de rayon ; quant au bogie B de 2 000 chevaux, il n'y aura pas plus de problèmes que pour les bogies de matériel remor-

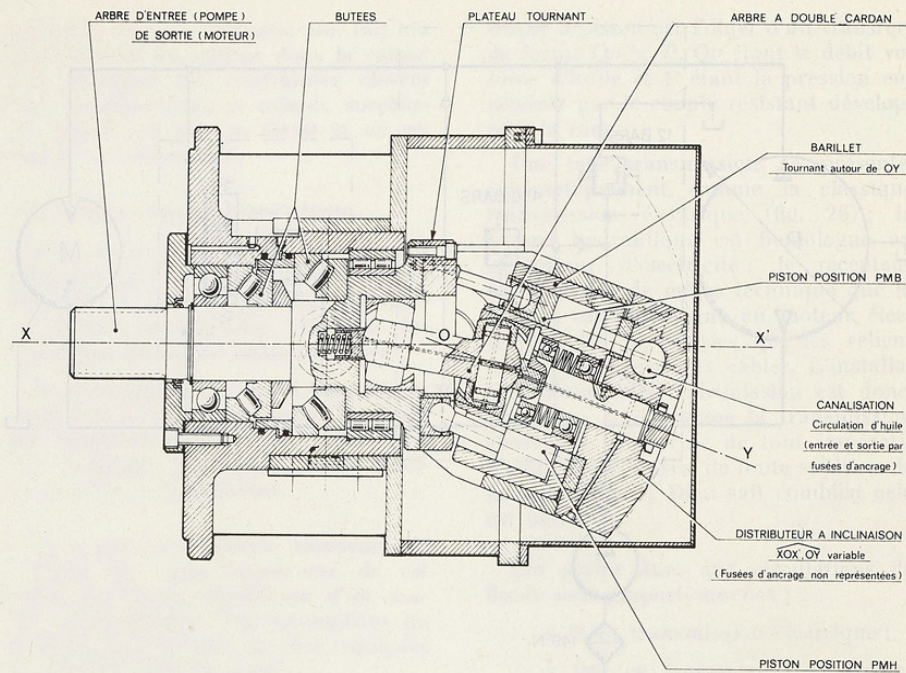


FIG. 28. — Coupe d'une pompe hydrostatique à barillets.

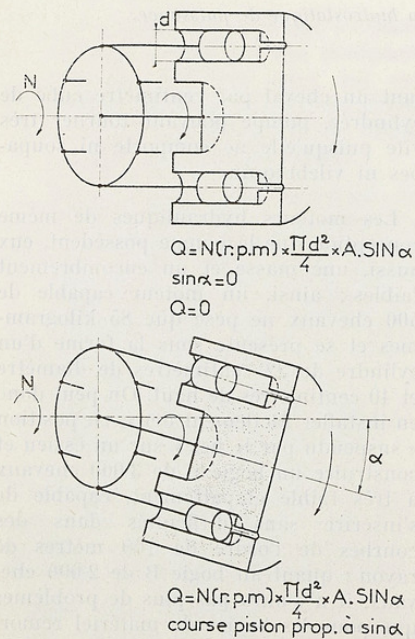


FIG. 29. — Variation de débit d'une pompe à barillet.

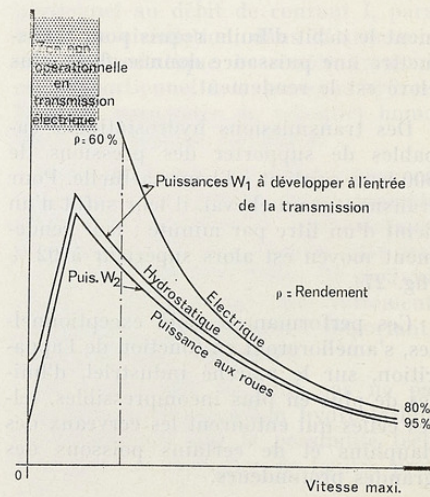


FIG. 30. — Comparaison des puissances moteur requises, auxiliaires de transmission inclus, pour la même puissance disponible aux roues, avec transmission électrique et transmission hydrostatique.

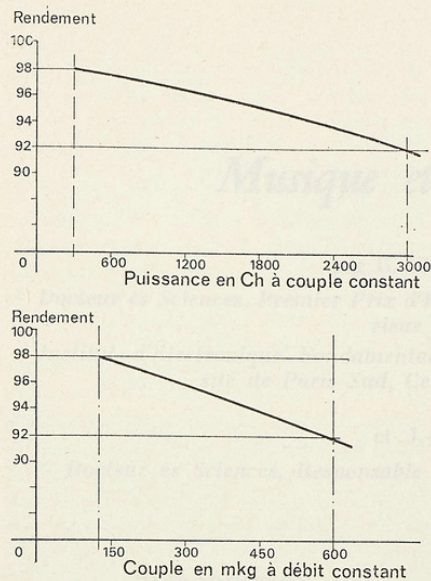


FIG. 27. — Courbes de rendements de transmission hydrostatique fonctionnant sous 500 bars.

qué : on pourra tourner en 25 mètres, si cela est nécessaire.

Pour faire varier la puissance transmise, il suffit de faire varier l'inclinaison du barillet (fig. 29), puisqu'ainsi on modifie la cylindrée engendrée en fonction du sinus de l'angle d'inclinaison (ce qui permet des réglages très fins aux vitesses faibles : marches soutenues à très faible allure, mises en tête...).

Si la puissance demandée est supérieure à celle que le diesel peut fournir à la vitesse de rotation qui lui a été assignée, un régulateur branché sur la sortie du régulateur diesel commande la diminution de l'angle.

Pour changer de sens de marche, le conducteur change, en pleine marche, le signe de l'angle d'inclinaison ; ainsi la transmission fait frein jusqu'au moment où, sans temps mort, on repart en marche arrière.

Par simple décompression de l'huile, tout patinage est jugulé avant que l'es-

sieu ne se soit emballé, par une technique équivalente à celle utilisée en transmission électrique.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée à la roue est la plus faible qui soit (fig. 30), du fait que le rendement de transmission est très élevé sur une très large plage de vitesse.

Du fait du rendement élevé, l'échauffement est faible, même au couple maxi admis par l'adhérence ; la puissance maximale peut être développée sans sujétion de limitation de durée et sans impératif de circulation à vitesse minimale.

Le diesel tournant, durant la majeure partie du temps dans la plage du régime économique, la consommation globale de combustible devrait, en moyenne, se situer au voisinage des 2/3 de la consommation en transmission électrique, pour une énergie dépensée à la roue constante.

Par surcroît, en cas d'emploi d'une transmission hydrostatique, le vilebrequin diesel :

- est affranchi de tout balourd, générateur de contraintes de flexion et des vibrations qui les accompagnent ;
- ne connaît pas de vibration de torsion induite par les organes entraînés.

**

Puis-je me permettre de suggérer à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale de prévoir, dans une décennie, de convier l'un des jeunes ingénieurs présents dans cette salle à présenter une conférence sur les caractéristiques des locomotives diesels à transmission hydrostatique, sur les résultats obtenus tant à l'échelon diesel qu'à l'échelon transmission, sur la contribution qu'elles auront apportée à l'actuelle perspective de ne pas baser notre devenir sur une galopante consommation d'énergie.

Les courbes de rendement η en fonction de la puissance P sont représentées sur la figure 27. On voit que le rendement est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00, et qu'il ne varie pas sensiblement avec la puissance.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

Les courbes de rendement η en fonction de la puissance P sont représentées sur la figure 27. On voit que le rendement est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00, et qu'il ne varie pas sensiblement avec la puissance.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

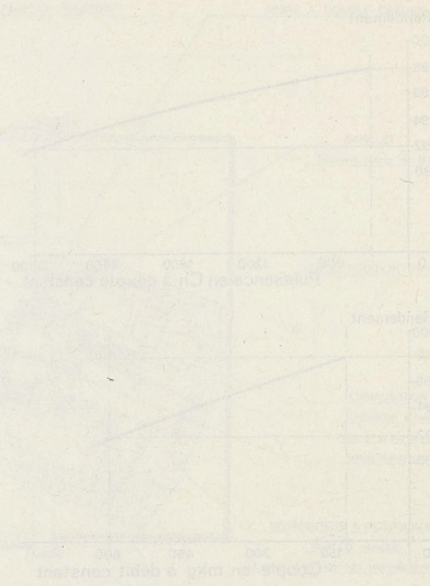


Fig. 27. — Courbes de rendement η en fonction de la puissance P pour un débit constant.

On voit que le rendement est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00, et qu'il ne varie pas sensiblement avec la puissance.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

La puissance requise pour fournir une puissance donnée P est la plus faible que soit η , d'où l'on voit que le rendement de transmission est très élevé, compris entre 0,95 et 1,00.

Musique et ordinateur (*)

par G. CHARBONNEAU,

Docteur ès Sciences, Premier Prix d'Harmonie du Conservatoire National Supérieur de Musique.

Institut d'Electronique Fondamentale, Laboratoire associé au C.N.R.S., Université de Paris Sud, Centre d'Orsay, 91405 Orsay.

et J.-C. RISSET

Docteur ès Sciences, Responsable du Département Ordinateur à l'I.R.C.A.M.

INTRODUCTION

L'ordinateur s'est introduit dans la musique sous deux aspects : d'une part comme instrument d'analyse et de synthèse des sons (1, 2, 3, 4), d'autre part comme dispositif pouvant combiner des sons entre eux, jouant ainsi en quelque sorte un rôle de compositeur (5, 6). Dans l'exposé que nous présentons ici, nous n'aborderons que le premier aspect en le limitant à l'étude de deux qualités fondamentales d'un son musical : la hauteur et le timbre. Nous nous attacherons à montrer que la hauteur et le timbre sont deux attributs perceptifs dont les relations avec la structure physique des signaux acoustiques sont complexes et qui ne sont pas aussi indépendants qu'on ne l'admet habituellement.

La hauteur est l'attribut qui permet de ranger les sons sur une échelle allant du grave à l'aigu (7). Le timbre n'a pas de définition unique : parfois on le considère comme l'attribut qui fait distinguer deux sons de même hauteur,

même intensité et présentés de la même façon (7), parfois il est considéré comme la qualité permettant de reconnaître l'origine du son (en particulier de différencier les qualités sonores de deux instruments de même famille). Ces définitions, qu'elles soient précises (hauteur) ou vagues (timbre) ne fournissent aucun renseignement sur la nature de la sensation perçue. C'est ce que nous allons tenter d'approfondir successivement pour la hauteur et pour le timbre.

I. — HAUTEUR DES SONS

I.1. CONCEPTIONS PHYSIQUES TRADITIONNELLES.

La hauteur a été longtemps (et est souvent encore) considérée comme directement liée à la fréquence fondamentale du signal acoustique (ce qui implique qu'elle ne peut exister que pour des sons périodiques ou pseudo-périodiques). Une autre conception de la hauteur a été avancée, notamment par

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 24 juin 1976.

Leipp (8). Elle indique que la sensation de hauteur est déterminée par l'équidistance entre deux raies voisines du spectre en fréquence. L'une ou l'autre de ces deux conceptions rend compte d'un certain nombre d'observations, mais trébuche dans des expériences simples à réaliser. Par exemple, la première ne peut expliquer qu'un son grave soit perçu dans certaines conditions de la même façon, qu'il comporte la fréquence fondamentale ou non ; la seconde est mise en défaut par des signaux comme les sons du piano dans le grave (9), ou ceux émis par certaines cloches, qui sont inharmoniques et qui possèdent cependant une hauteur unique.

Ces conceptions postulent implicitement que la hauteur est un phénomène unidimensionnel. Or, de multiples expériences ont indiqué que la perception de la hauteur était influencée par des éléments tels que l'intensité (10), des facteurs temporels (12), ou encore la composition spectrale (13). Si l'importance de l'intensité ou des facteurs temporels reste mesurée pour la hauteur (11), le rôle de la composition spectrale a été reconnu par divers auteurs depuis longtemps (14), mais n'avait pu être clairement mis en évidence, faute de moyens d'investigation appropriés. Récemment, grâce à la synthèse de sons par ordinateur (15), on a pu contrôler assez finement les paramètres des sons

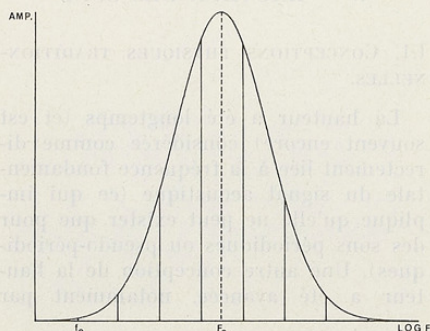


FIG. 1. — Structure harmonique des stimuli utilisés pour les trois expériences.

pour étudier, dans certains types de son, les corrélations du spectre avec la sensation de hauteur. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons montrer qu'il est possible ainsi, dans certains cas, de dissocier la hauteur en deux composantes : l'une que nous appellerons hauteur spectrale liée à la répartition de l'énergie dans le spectre, et apparentée ainsi au timbre, l'autre, que nous nommerons hauteur tonale, liée à la périodicité de l'onde sonore et qui est la même pour tous les do, les ré..., etc. (16).

1.2. NOTION DE HAUTEUR TONALE.

Nous avons réalisé une expérience dans laquelle nous nous sommes proposés d'étudier le comportement de l'oreille, lorsqu'on élimine pratiquement la possibilité de juger les sons selon des critères relatifs à la composition spectrale. Pour cela, nous avons synthétisé par ordinateur (17) 144 stimuli formés de couples résultant de la combinaison 2 à 2 de 12 sons de fréquence fondamentale différente, mais d'enveloppe spectrale fixe assurant une hauteur spectrale approximativement invariante. Chacun des 12 sons comprend 8 harmoniques à distance d'octave et a une fréquence fondamentale correspondant à l'un des degrés de la gamme chromatique. La figure 1 représente la structure harmonique de ces sons qui s'écrit mathématiquement :

$$(1) \quad A_n = 1\,500 a^n = \text{amplitude du } n^{\text{ième}} \text{ harmonique}$$

avec :

$$(2) \quad a_n = e^{-7} [(\text{Log } 2^n f_0 / \text{Log } F_0) - 1]^2$$

pour

$$n = 0, 1, 2, \dots, 7.$$

$$F_0 = 400 \text{ Hz.}$$

$$f_0 = 32,703 \text{ Hz (do),}$$

$$34,647 \text{ Hz (do\#) ... etc. 61,735 (si)}$$

Ces stimuli ont été soumis au jugement d'auditeurs divers. A chacun de ces auditeurs, il a été demandé d'exprimer l'écart de la hauteur existant entre les deux sons de chaque couple par un chiffre compris entre 0 et 10, 0 indiquant

un écart nul (sons identiques) et 10, l'écart jugé maximal. En pratique, l'échelle adoptée par la plupart des sujets a été comprise entre 0 et 6.

Les réponses à ces tests de 20 sujets ont été fournies comme données à un programme d'analyse factorielle (18) qui a abouti aux résultats suivants (19) :

— Deux facteurs principaux ont été dégagés représentant chacun 35 à 45 % de l'information totale.

— La représentation graphique des variables (les notes de la gamme chromatique) en fonction de ces deux facteurs est approximativement un cercle (Fig. 2). Les notes se répartissent à égale distance sur une courbe fermée, ce qui signifie que l'auditeur juge sensiblement de la même façon, par exemple, l'éloignement du si par rapport au do (soit presque un doublement de la fréquence fondamentale) et celui du do $\sharp$ au do (soit une multiplication de la fréquence fondamentale par $\sqrt[12]{2}$).

L'analyse factorielle fournissant un modèle géométrique rendant bien compte de la structure des données, sans tenir compte d'idées préconçues sur ces données, on constate qu'en l'absence d'indices spectraux, deux sons formés d'octave ne se différencient que par un paramètre associé (Fig. 2) à l'angle polaire existant entre ces deux sons. C'est ce paramètre que nous avons appelé hauteur tonale, et l'expérience décrite indique que les notes de la gamme chromatique sont séparées par un écart de hauteur tonale constant, aucune référence absolue de hauteur tonale ne semblant exister *a priori*.

L.3. NOTION DE HAUTEUR SPECTRALE.

Nous avons conçu une deuxième expérience dans laquelle la hauteur tonale a été maintenue fixe, tandis que la répartition de l'énergie dans le spectre était variable. Pour cela, nous avons de nouveau synthétisé par ordinateur 36 couples de sons, résultant de la combinai-

son 2 à 2 de 6 sons distincts. Chaque son a une structure harmonique similaire à ceux de l'expérience précédente et en particulier l'amplitude de chaque harmonique est donnée par la formule (2). Cependant, cette fois c'est f_0 qui est fixé (égal à 65,406 Hz) et F_0 qui est variable de 130,812 Hz (ut2) à 4 186 Hz (ut7) par saut d'octave. Ainsi la hauteur tonale est fixe, tandis que la hauteur spectrale varie, repérée ici par le sommet de l'enveloppe spectrale F_0 .

Nous avons soumis à nouveau ces stimuli au jugement d'auditeurs divers. Les écarts séparant les deux sons d'un même couple, issus de ces jugements ont été alors traités par analyse factorielle et ont ainsi fourni les résultats suivants (20) : l'espace représentatif de ces écarts est fondamentalement à une dimension, le facteur associé à cette dimension regroupant environ 85 % de l'information. D'autre part, sur l'axe correspondant à cette dimension, les sons se projettent linéairement dans l'ordre des F_0 croissants (cf. Fig. 3). Il est donc naturel d'interpréter cet axe comme un axe

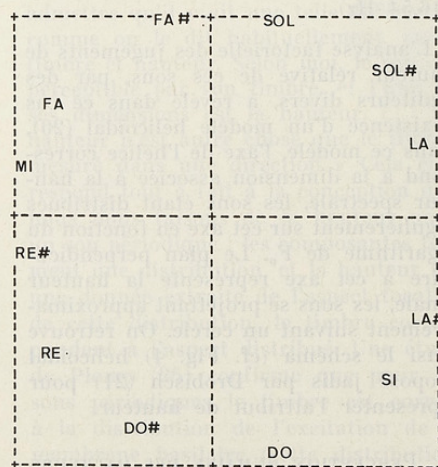


Fig. 2. — Représentation des stimuli de la première expérience dans le plan défini par les axes 1 (horizontal) et 2 (vertical) associés aux deux premiers facteurs de l'analyse.

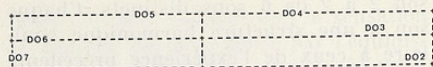


FIG. 3. — Représentation des stimuli de la deuxième expérience.

grave-aigu, le modèle perceptif paraissant suivre ici assez simplement la situation physique.

Après avoir fait varier séparément la hauteur tonale et la hauteur spectrale, il était légitime de les faire varier simultanément (d'une façon bien déterminée, alors que, pour des sons naturels, ces variations sont en général mal connues) dans une troisième expérience. Pour cela nous avons repris le même type de signaux, tels qu'ils sont définis par la formule (2) mais, cette fois, F_o et f_o varient simultanément de telle sorte que la valeur de F_o soit divisée par 4 lorsque f_o double. (Dans les sons naturels, f_o et F_o varient en général dans le même sens). Nous avons synthétisé ainsi 12 sons distincts, qui combinés entre eux forment 144 couples, chaque son appartenant à une gamme par ton s'étendant sur 2 octaves (f_o variant de 32,703 Hz à 116,54 Hz).

L'analyse factorielle des jugements de hauteur relative de ces sons, par des auditeurs divers, a révélé dans ce cas l'existence d'un modèle hélicoïdal (20). Dans ce modèle, l'axe de l'hélice correspond à la dimension associée à la hauteur spectrale, les sons étant distribués régulièrement sur cet axe en fonction du logarithme de F_o . Le plan perpendiculaire à cet axe représente la hauteur tonale, les sons se projetant approximativement suivant un cercle. On retrouve ainsi le schéma (cf. Fig. 4) hélicoïdal proposé jadis par Drobisch (21) pour représenter l'attribut de hauteur.

I.4. PERCEPTION HUMAINE DES HAUTEURS TONALE ET SPECTRALE.

L'analyse des jugements, des différents sujets, montre également l'existence de réponses contraires pour des mêmes sti-

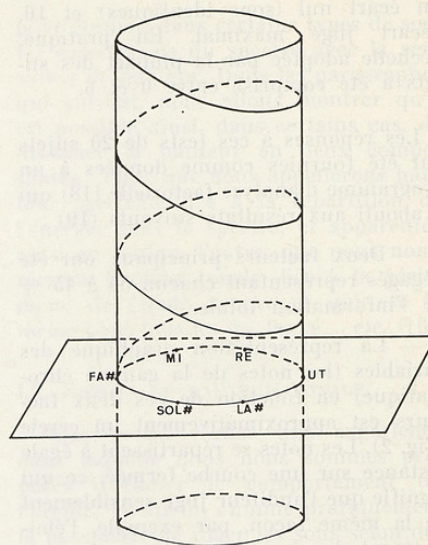


FIG. 4. — Schéma hélicoïdal rendant compte de la hauteur des stimuli de la troisième expérience. L'axe de l'hélice représente la hauteur spectrale, tandis que la hauteur tonale est symbolisée par la projection de l'hélice sur un plan de section droite.

muli sur le sens de variation de hauteur. Cela suggère que le concept de hauteur sonore varie d'un individu à un autre suivant le poids respectivement attaché à la hauteur spectrale et à la hauteur tonale (20). Ces différences incitent à penser que la perception des deux aspects de la hauteur font appel à des processus de jugements distincts. Or, diverses études cliniques ou psychologiques ont mis en évidence le rôle de tel ou tel hémisphère cérébral pour assurer telle ou telle fonction. En particulier, il est généralement admis (22, 23) que l'hémisphère gauche est dominant pour les fonctions analytiques (comme peut l'être la perception du langage parlé) et l'hémisphère droit prépondérant pour les traitements globaux (comme par exemple la perception d'une forme). Or la perception de la hauteur tonale met certainement en jeu un processus de détection complexe (elle est renforcée par l'édu-

cation musicale, laquelle est très longue à acquérir), tandis que la hauteur spectrale semble être une appréhension relativement brute du signal. Chaque oreille étant reliée préférentiellement à un hémisphère cérébral donné (l'oreille gauche à l'hémisphère droit et vice versa), il est naturel de s'attendre à ce qu'un même signal soit perçu différemment suivant le traitement requis (synthétique ou analytique) lorsqu'il est présenté à l'oreille gauche ou à l'oreille droite. C'est pourquoi nous avons réalisé une expérience (24) permettant la mise en évidence d'éventuelles différences entre les deux oreilles pour la perception de la hauteur tonale ou de la hauteur spectrale.

Nous avons formé des « mélodies spectrales » (en faisant varier l'enveloppe spectrale et en maintenant fixe la fréquence fondamentale) et des « mélodies tonales » (en faisant varier la fréquence fondamentale et en maintenant fixe l'enveloppe spectrale). Dans l'expérience, chaque stimulus est constitué d'une mélodie servant de modèle, suivie d'une mélodie de même nature (tonale ou spectrale) comportant éventuellement une différence, l'auditeur devant décider si les deux mélodies sont identiques ou non. Le décompte des erreurs sur de nombreux sujets a établi que pour des auditeurs droitiers, les mélodies tonales sont mieux perçues par l'oreille droite (donc par l'hémisphère cérébral gauche) et les mélodies spectrales sont reconnues plus sûrement par l'oreille gauche (hémisphère cérébral droit). Cette expérience confirme donc l'aspect analytique de la perception de la hauteur tonale et l'aspect global de la perception de la hauteur spectrale.

1.5. HAUTEUR ET TIMBRE.

Les exemples que nous avons donnés plus haut concernant hauteur tonale et hauteur spectrale ont été réalisés avec des sons très artificiels et particuliers : la dichotomie du concept de hauteur sonore est loin d'être toujours aussi

nette. Dans les sons qui ne comportent que des octaves, l'ambiguïté d'octave est poussée à son point extrême et les variations de distribution spectrale correspondent incontestablement à une variation de hauteur. Mais si tous les harmoniques sont présents, ils créent une forte focalisation vers une hauteur unique qui est plus prégnante généralement qu'une hauteur spectrale résultant d'une distribution des composantes harmoniques suivant l'axe des fréquences : nous donnerions plutôt à cette hauteur spectrale le nom de timbre. W. Köhler (15) avait, dès 1915, distingué dans la sensation sonore deux aspects variant en fonction de la fréquence, et qu'il avait appelés respectivement « hauteur musicale » et « corps du son ». Le « corps du son » est étroitement lié au timbre, alors que la hauteur musicale permet d'identifier des notes et des intervalles. Köhler indiquait aussi que les sujets non musiciens peuvent avoir une perception très imprécise de la hauteur musicale, mais qu'ils peuvent être très sensibles au « corps du son », aux aspects du timbre. La remarque suivante d'Arnold Schoenberg (25) est à peu près contemporaine de l'étude de Köhler : « Je ne peux guère admettre qu'il y ait une telle différence, comme on le dit habituellement, entre timbre et hauteur. Selon moi, le son est perceptible par son timbre, et l'une de ses dimensions est la hauteur. (...) La hauteur n'est autre chose que le timbre mesuré dans une direction. » Cela correspond tout à fait à la conception que nous nous faisons de la hauteur pour un son périodique : les composantes forment une distribution, et la hauteur est une donnée extraite de l'aspect focalisé de cette distribution, le timbre correspondant à l'aspect distribué. Une étude de Plomp (26) confirme que pour les sons périodiques le timbre est corrélé à la distribution de l'excitation de la membrane basilaire (cette distribution, rappelons-le, fonctionne comme un analyseur de fréquence à large bande, et c'est à partir de détectations de périodicité consécutives à cette analyse qu'est inférée la hauteur).

II. — TIMBRE DES SONS

II.1. PROBLÈMES DE LA CONCEPTION CLASSIQUE DU TIMBRE.

Ce que nous venons de dire confirme le point de vue classique sur le timbre, exposé dans l'introduction : pour des sons périodiques, le timbre dépend du spectre en fréquence. On sait que la modification de l'équilibre spectral altère le timbre et qu'on peut par exemple augmenter la « présence » du son en renforçant la région voisine de 2 000 ou 3 000 Hz. Pourtant, réduire le timbre au spectre en fréquence (en réduisant le son musical au son périodique) conduit à de nombreuses difficultés.

Avant que la « haute fidélité » ne soit la règle, on pouvait identifier les instruments de musique dans les enregistrements, malgré d'importantes distorsions linéaires bouleversant les spectres. Le spectre d'un son est d'ailleurs facilement modifié, même lors d'une transmission aérienne. Ainsi, les instruments de musique ont un rayonnement sonore anisotrope (27) : lorsqu'on tourne autour de l'instrument, le spectre entendu varie considérablement, mais cela n'affecte guère la reconnaissance auditive de l'instrument. Et la réponse en fréquence d'une salle réverbérante quelconque est très tourmentée et varie beaucoup lorsqu'on se déplace, même de quelques centimètres (28) : les spectres sont donc extrêmement perturbés, sans que l'identification des sources sonores soit affectée.

Il suffit de passer à l'envers une bande magnétique portant un enregistrement de piano pour modifier le timbre à tel point que l'instrument ne soit plus reconnaissable : or, les spectres successifs sont restés les mêmes. Cette expérience simple indique l'importance des facteurs temporels pour le timbre ; nous en donnerons d'autres exemples. Or, ces facteurs temporels ont longtemps été méconnus. En effet, jusqu'à une époque récente, les appareils d'analyse sonore

disponibles étaient très lents et ne pouvaient fournir pour un son qu'un spectre moyen, ou le spectre d'une période particulière (qu'on supposait se répéter identiquement à elle-même, la visualisation de quelques périodes successives faisant rarement apparaître de modification substantielle de la forme d'onde). Helmholtz (29) s'est rendu compte que « certaines particularités caractéristiques des sons de divers instruments dépendent de la façon dont ces sons débute et se terminent » ; pourtant, il a limité ses investigations aux particularités des sons musicaux indépendantes du temps, considérant qu'elles déterminaient la qualité musicale du son. La plupart des études ultérieures sur le timbre ont négligé l'aspect temporel du son.

Toutefois, les études de Stumpf (30) ont indiqué (voici plus de cinquante ans) l'importance des transitoires d'attaque pour la reconnaissance du son, mais les tentatives d'analyser les transitoires de sons instrumentaux n'ont pas donné de résultats très significatifs. Les transitoires varient d'un son à un autre, même pour des sons auditivement semblables et, ce qui est significatif, c'est souvent toute l'évolution temporelle, pas seulement un transitoire initial précédant une phase stationnaire. On a tendu à généraliser hâtivement des conclusions particulières, ce qui a conduit à des contradictions qui ont jeté un certain discrédit sur les données acoustiques relatives au timbre : il a manqué à ces études une possibilité de synthèse pour vérifier et décanter les résultats des analyses.

Récemment sont apparus des moyens d'analyse plus adéquats, en particulier le sonographe, développé vers 1940 aux Bell Laboratories pour l'étude de la parole et qui donne « un spectre évolutif », c'est-à-dire une analyse qui permet de suivre l'évolution temporelle du spectre. Le sonographe, qui donne du son une « photographie » capturant la plupart des détails significatifs, a permis de rendre compte de la raison d'être de certaines pratiques musicales qui paraissaient gratuites (31). Diverses modalités d'ana-

lyse ont pu être mises en œuvre grâce à l'ordinateur. L'analyse du son démontre que les sons musicaux, loin d'être rigoureusement périodiques, sont souvent très complexes, elle met en évidence les variations au cours du son de certains paramètres, variations qui ne sont pas perçues comme telles, mais plutôt comme qualités distinctives, et elle permet d'énumérer nombre de particularités du son dont peut dépendre le timbre. Mais, sans une vérification par synthèse, cette énumération reste spéculative et elle ne donne pas la clé de ce qui caractérise certains timbres spécifiques.

II.2. ETUDES SUR LE TIMBRE FAISANT APPEL A LA SYNTHÈSE.

La synthèse des sons par ordinateur (15) est très importante pour l'étude du timbre, car elle permet pour la première fois de produire des sons à la fois suffisamment complexes pour présenter un intérêt musical et parfaitement contrôlables dans tous leurs paramètres. La plupart des études psychoacoustiques antérieures étaient faites avec les seuls stimuli sonores qu'on pouvait contrôler précisément : sons sinusoïdaux, ondes carrées ou triangulaires, trains d'impulsion, bandes de bruit. Aussi la psychoacoustique musicale — étude de la relation entre paramètres physiques et aspects sensibles des sons musicaux — n'en est-elle qu'à ses débuts.

L'ordinateur permet ainsi de mettre en œuvre une méthode significative d'étude du timbre d'un instrument de musique. On analyse d'abord des sons de l'instrument, en faisant éventuellement appel à l'ordinateur. De cette analyse, on extrait une description physique des sons : à partir de cette description, on synthétise des sons, qui doivent être auditivement très proches des sons initiaux dans la mesure où l'analyse a retenu les paramètres importants du timbre. Ensuite, on peut faire varier individuellement chaque paramètre du son synthétisé pour évaluer sa pertinence auditive, ce qui permet, en laissant tomber les paramètres non pertinents, de

simplifier la synthèse — car les résultats des analyses sont très complexes — et de définir des modèles ou en tout cas une caractérisation du timbre de l'instrument.

Ainsi les sons synthétisés à partir de descriptions « classiques » de sons de trompette ne rappellent en rien les cuivres, mais une étude faite suivant cette méthode (32) m'a permis d'isoler certaines particularités importantes, et en particulier une propriété qu'on peut considérer comme un modèle des sons cuivrés : le fait que la proportion d'harmoniques aigus du spectre s'enrichit avec l'intensité. Chowning (33) a pu utiliser sa technique de modulation de fréquence pour réaliser ce modèle de variation des spectres avec l'intensité et obtenir simplement des sons cuivrés. Morrill (34) a pu ajouter au réalisme des synthèses en y ajoutant des « accidents », des déviations de la fréquence par rapport aux valeurs « justes », déviations qui sont souvent perçues en termes de timbre.

L'étude de la trompette montre que le timbre cuivré peut se caractériser non par la valeur de tel ou tel paramètre, mais par une relation entre divers paramètres. Il semble que ce soit souvent le cas. Nous donnerons d'autres exemples, mais nous parlerons surtout ici de l'étude du timbre du violon réalisée par Mathews (35) et qui lui a permis de dégager un modèle du timbre des cordes frottées : ce timbre est lié à une courbe de réponse tourmentée de l'instrument, avec un rapport dynamique entre pics et vallées, ni trop fort (ce qui donnerait des sons creux et inégaux), ni trop faible (ce qui donnerait des sons ternes). Une telle courbe de réponse provoque, en liaison avec le vibrato (modulation périodique lente de la fréquence) une modulation spectrale très complexe qui est typique de la qualité du vibrato de violon, par opposition au vibrato « électronique » résultant de la seule modulation de fréquence d'un spectre invariable. Mathews a pu réaliser un violon électronique qu'on joue comme un violon, mais dont la caisse est remplacée par des circuits

réglables, et qui peuvent être réglés de façon que l'instrument se rapproche de très près d'un violon classique, ou au contraire de façon à ce qu'il s'éloigne. C'est ainsi qu'en remplaçant le circuit qui met en œuvre le modèle décrit ci-dessus par un autre réalisant la propriété caractéristique des sons cuivrés, on peut obtenir — avec un archet — des sons évoquant la trompette !

On peut encore par synthèse attribuer certaines qualités subjectives du son à certaines structures physiques. Ainsi une légère inharmonicité peut donner un sentiment de chaleur. On peut suggérer une extension de la source sonore en introduisant un décalage de quelques dizaines de millisecondes entre deux signaux identiques émis par deux haut-parleurs espacés.

II.3. TIMBRE ET OÛÏE.

Il semble que l'évolution de l'ouïe ait tendu à tirer un parti efficace des propriétés des sons pour fournir des informations utiles sur l'environnement. Mieux que la vue ou le toucher, l'ouïe joue un rôle d'alerte. On ne doit pas s'étonner que la perception auditive soit spécialement sensible aux modifications de l'environnement sonore, et qu'elle tende à éliminer de la conscience les sons stables ou permanents. Il est normal que l'audition ne se fie pas seulement à la structure d'un spectre pour évaluer le timbre et identifier l'origine du son, cette structure spectrale étant sévèrement distordue dans la propagation du son. La reconnaissance de la source sonore tire parti de paramètres résistants à la distorsion. Ainsi l'oreille est très sensible aux aspects fréquentiels, qui ne sont modifiés entre source sonore et auditeur que de façon exceptionnelle [par exemple par effet Doppler, mais l'oreille en tire alors des indices sur le mouvement des sources (36)]. Au contraire, l'oreille est remarquablement insensible aux relations de phase entre les composantes d'un son complexe périodique, ce qui est heureux, puisque ces relations sont complètement brouillées

dans un environnement réverbérant. Il est normal que l'attribut de timbre soit lié à des caractères spectraux ou temporels élaborés et résistants aux distorsions, de façon à préserver dans le « percept » auditif la « constante des choses réelles » (Koffka), ce qui est nécessaire pour que l'audition donne des indications utiles sur l'environnement.

II.4. L'ESPACE DES TIMBRES.

Dans l'audition musicale, les fonctions d'alerte ou de reconnaissance des sources jouent pour ainsi dire à vide. Le timbre ne sert pas seulement à identifier la source sonore, à mettre sur le son une étiquette, mais il peut jouer en musique un rôle important. Cela nous ramène à Schoenberg, qui a tenté dans l'une des pièces pour orchestre Op. 16 une « mélodie de timbres » (*Klangfarbenmelodie*) : loin d'être un élément accessoire ou décoratif pour une pensée musicale jouant principalement sur les hauteurs (comme dans l'Art de la fugue de Bach), le timbre devient ainsi un aspect essentiel de la construction musicale. Depuis Schoenberg et Varèse, les compositeurs se préoccupent toujours davantage d'intervenir d'une manière compositionnelle — et non seulement décorative — dans l'élaboration de la structure même du son (37). Ligeti crée instrumentalement des polyphonies serrées, des tissages sonores qui composent des timbres.

Dans une importante étude du timbre instrumental, Grey (38) a accompli à l'aide de l'ordinateur des interpolations entre sons de timbres différents, non pas fondus enchainés, mais métamorphoses progressives d'un timbre à un autre. On voit s'ouvrir la possibilité de parcours continus dans l'espace des timbres, et la perspective de compositions élaborées de la microstructure sonore ; non content de composer avec des sons, on pourra composer le son lui-même.

L'ordinateur permet un contrôle fin sur l'espace physique des sons. Mais il est utile d'explorer l'espace perceptif du timbre, pour dégager certaines dimen-

sions suivant lesquelles s'articulent chez l'auditeur ressemblances ou relations de timbres. Les techniques d'analyse multidimensionnelle ont déjà été appliquées par Grey, Wessel (39) (et en France par Rodet) à l'exploration de l'espace perceptif des timbres. Sans doute subsistera-t-il toujours pour de telles études le problème du contexte musical : il reste que ces études permettront peut-être de dégager, dans le timbre des dimensions, des attributs — autres que la hauteur — pouvant se prêter à des mises en échelle, à des manipulations musicales plus élaborées et cohérentes, que le « timbre » au sens classique et global. On pourrait alors concevoir une musique fondée sur les opérations perceptives : elle pourrait mettre en scène des êtres sonores qui aient une véritable identité pour la perception, en ce sens qu'ils feraient jouer au plus profond nos facultés de reconnaissance et de découverte dans l'ordre

du son. L'exploration de l'espace perceptif des timbres, et les études sur la caractérisation d'un timbre (qui relie un timbre à des structures de relation entre paramètres) nous font entrevoir comment on pourrait agencer ces êtres sonores qui pourraient être extrêmement prégnants : même s'ils ne correspondent à aucun « corps sonore », ils seraient profondément ancrés dans la perception. La commande de ces êtres sonores et de leurs transformations pourrait allier la préparation d'une écriture élaborée (démultipliée par des programmes) et la spontanéité du geste. Utopie sans doute, mais les moyens qui peuvent nous mener dans cette direction sont dès maintenant disponibles : les recherches dans ce sens devraient nous donner de l'univers sonore une nouvelle perspective, certainement en tout cas des conceptions de la hauteur et du timbre plus complexes que celles présentées au début de cet exposé.

Bibliographie

1. CHARBONNEAU (G.), KARATCHENTZEV (P.) et RISSET (J.-C.), 1972. — Un système de synthèse directe de sons à l'aide d'ordinateur. *Revue d'Acoustique*, n° 21, 289 (disques d'exemples joint).
2. MATHEWS (M. V.), MOORE (F. R.) et RISSET (J.-C.), 1974. — *Computers and future music*. *Science*, 183, 263.
3. RISSET (J.-C.), et MATHEWS (M. V.), 1969. — Analysis of instrument tones. *Physics Today*, 22, n° 2, 23.
4. RISSET (J.-C.), 1969. — *An introductory catalog of computer synthesized sounds*. Bell Telephone Laboratories (disque d'exemples joint).
5. BARBAUD (P.), 1966. — *Initiation à la composition musicale automatique*. Dunod, Paris.
6. RIOTTE (A.), mars 1974. — Informatique musicale, jonction nouvelle entre art et science. *Euro Spectra*, 13, 2.
7. AMERICAN STANDARD ACOUSTICAL TECHNOLOGY, 1960. — American Standards Association, New York.
8. LEIPP (E.), 1971. — *Acoustique et musique*. Masson et Cie, éd., Paris.
9. FLETCHER (H.), BLACKMAN (E. D.) et STRATTON (R.), 1962. — Quality of piano tones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 749.
10. STEVENS (S. S.), 1935. — The relation of pitch to intensity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 6, 150.
11. COHEN (A.), 1961. — Further investigation of the effects of intensity upon pitch of pure tones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 33, 1363.
12. BACHEM (A.), 1954. — Time factors in relative and absolute pitch determination. *J. Acoust. Soc. Am.*, 26, 751.
13. GUTTMAN (N.) et FLANAGAN (J. L.), 1959. — Pitch of high pass filtered pulse trains. *J. Acoust. Soc. Am.*, 36, 757.

14. KÖHLER (W.), 1915. — Akustische Untersuchungen. *Zeitschrift f. Psychologia*, 72, 159.
15. MATHEWS (M. V.), 1969. — The Technology of computer music. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.
16. SHEPARD (R. N.), 1964. — Circularity of judgments of relative pitch. *J. Acoust. Soc. Am.*, 36, 2346.
17. CHARBONNEAU (G.), KARATCHENTZEFF (P.) et RISSET (J.-C.), 1972. — Un système de synthèse directe de sons à l'aide d'ordinateur. *La Revue d'Acoustique*, n° 21, 289.
18. BENZECRI (J.-P.), 1973. — *L'analyse des correspondances*. Dunod, Paris.
19. CHARBONNEAU (G.) et RISSET (J.-C.), 1973. — Circularité de jugements de hauteur sonore. *C.R.Ac.Sc. Paris*, 277, 623.
20. CHARDONNEAU (G.) et RISSET (J.-C.), 1975. — Jugements relatifs de hauteur ; schémas linéaires et hélicoïdaux. *C.R.Ac.Sc., Paris*, 281, 289.
21. DROBISCH (M. V.), 1855. — Abhand Math. Phys. König Sachs. Ges. Wiss., 4, 1-120.
22. KIMURA (D.), 1973. — The asymmetry of the human brain. *Science*, 3, 70.
23. SPELLACY (F.), 1970. — Lateral preferences in the identification of patterned stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.*, 47, 574.
24. CHARBONNEAU (G.) et RISSET (J.-C.), 1975. — Différences entre oreille droite et oreille gauche pour la perception de la hauteur des sons. *C.R.Ac.Sc., Paris*, 281, 163.
25. SCHOENBERG (A.), 1911. — *Harmonielehre*. Universal Ed., Vienne.
26. PLOMP (R.), 1971. — Pitch versus timbre. *7th ICA Congress*, Budapest.
27. MEYER (J.), 1966. — *Akustik der Holzblasinstrumente in Einzeldarstellung*. Ed. Das Musikinstrument, Frankfurt.
28. WENTE (E. C.), 1935. — Characteristics of sound transmission in rooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 7, 123.
29. HELMHOLTZ (H.), 1954. — *Sensations of tones*, 1877, traduction anglaise par E. J. Ellis, Dower, New York.
30. STUMPF (C.), 1926. — *Die Sprachlaute*. Springer Verlag, Berlin.
31. LEIPP (E.), 1971. — *Acoustique et musique*. Masson, Paris.
32. RISSET (J. C.) et MATHEWS (M. V.), 1969. — Analysis of instrument tones. *Physics to day*, 22, n° 2, 23.
33. CHOWNING (J. M.), 1973. — The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation. *J. Audio Eng. Soc.*, 21, 526-534.
34. MORRILL (D.). — Article à paraître au *J. Audio Eng. Soc.*
35. MATHEWS (M. V.) et KOHUT (J.), 1973. — Electronic simulation of violin resonances. *J. Acoust. Soc. Am.*, 53, 1620-1626.
36. CHOWNING (J. M.), 1971. — The simulation of moving sound sources. *J. Audio Eng. Soc.*, 19, 2-6.
37. ERICKSON (R.), 1975. — *Sound structure in music*. University of Ca Press, Los Angeles.
38. GREY (J. M.), 1975. — An exploration of musical timbre. *Ph. D. Thesis*, Stanford University.
39. WESSEL (D. L.), 1973. — *Communication to Psychometric Society Meeting*. San Diego.
40. Une partie des recherches évoquées dans cet article ont pu être effectuées grâce à l'aide de la D.G.R.S.T.

*Problèmes actuels dans la lyophilisation des produits biologiques **

par M. LE PEMP

*Laboratoire de Biologie
Physico-chimique,
E.N.S.B.A.N.A.,
Université de Dijon*

Depuis quarante ans, dans l'industrie pharmaceutique, et depuis vingt ans dans l'industrie alimentaire, la lyophilisation, c'est-à-dire la dessiccation sous vide d'échantillons congelés, étend ses applications à des matériaux très divers : solutions, suspensions, émulsions, tissus, organes... Elle peut constituer, soit une étape intermédiaire de fabrication, soit une méthode de conservation à long terme.

Les différents constituants biologiques n'offrent pas tous la même aptitude à la lyophilisation :

Certaines protéines subissent des modifications conformationnelles importantes (déshydrogénase lactique, L-asparaginase, catalase, myosine...) accompagnées, ou non, de pertes d'activité sensibles, tandis que d'autres protéines ne sont pas modifiées par ce traitement. Le comportement des protéines soumises à la lyophilisation est encore assez peu connu, cependant il semble qu'il existe une relation entre la stabilité des

macromolécules et leurs structures primaire et tridimensionnelle.

Ainsi, dans le cas des protéines globulaires, la présence de ponts disulfure accroît la stabilité, alors que la présence de groupements sulfhydriles libres augmente les risques de dénaturation. En outre, Hanafusa (1972) a constaté que les protéines fibreuses sont plus sensibles à la déshydratation que les protéines globulaires.

Quelques additifs ont permis de réduire la dénaturation des protéines pendant la lyophilisation : des macromolécules (albumine), des acides aminés (glycine, glutamate), des sucres (saccharose, glucose, lactose, inositol).

Bien qu'il s'agisse de phénomènes de natures différentes, cette hétérogénéité de comportement se remarque également avec les sucres ; une concentration élevée en sucres réducteurs dans un système biologique est responsable des problèmes posés pendant la lyophilisation

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 4 novembre 1976.

de ces solutions : l'affaissement de la structure poreuse du produit sec.

La présence de lipides rend la lyophilisation plus difficile, en particulier lorsqu'ils forment à la surface des échantillons, une pellicule de faible perméabilité à la vapeur d'eau.

Les acides gras insaturés présentent en outre le risque d'une oxydation rapide du produit sec, accompagnée d'une production de radicaux libres dont la recombinaison avec des macromolécules vitales (acides nucléiques, protéines), pourrait être à l'origine de la perte d'activité de certains systèmes (microorganismes).

L'hétérogénéité de l'aptitude à la lyophilisation des différents constituants biologiques explique le fait que, pour chaque échantillon à traiter, les conditions optimum de lyophilisation et les problèmes rencontrés soient différents.

Actuellement, les problèmes les plus couramment rencontrés en lyophilisation proviennent du *manque de stabilité de la couche poreuse lors de la lyophilisation* de certains produits, en particulier, les liquides riches en sucres et en acide citrique ; on peut remarquer que l'affaissement de structure est également responsable des problèmes rencontrés dans le séchage par atomisation des mêmes produits. Les conséquences de ces phénomènes sont parfois recherchées [couleur plus foncée pour le café (Flink, 1975)], mais, en général, ils entraînent des changements peu favorables dans l'aspect du produit, des changements de couleur, des difficultés de séchage, et aussi d'une perte importante des composés volatils (Thijssen, 1975, Voilley, 1975). Ce phénomène d'affaissement de structure est le principal problème rencontré dans la lyophilisation des jus de fruits, c'est donc cet exemple des jus de fruits ou de solutions modèles de compositions voisines des jus de fruits que nous avons choisi pour en discuter. Cependant, il faudra tenir compte de ce phénomène pour le choix d'un milieu de lyophilisation pour microorganismes par exemple, de ma-

nière à obtenir un produit lyophilisé homogène, facile à réhydrater et d'aspect satisfaisant.

Un autre problème, essentiel en lyophilisation, est la *rétenction des composés volatils*. Tout en respectant l'ensemble de ses propriétés biologiques, la lyophilisation s'accompagne souvent d'une perte plus ou moins importante des composés aromatiques de l'échantillon traité. Il est bien sûr souhaitable de limiter ces pertes lorsqu'il s'agit de produits alimentaires. Au contraire, l'élimination des composés volatils est recherchée dans certains cas, par exemple, lorsque la dissolution d'une substance biologique, avant lyophilisation, nécessite un mélange d'eau et de solvant non aqueux.

Enfin, d'autres problèmes importants se posent lorsqu'il s'agit de définir les *conditions optimum de stockage du produit sec* ; en effet, ces conditions, spécifiques pour chaque produit, déterminent la durée et la qualité de la conservation.

L'AFFAISSEMENT DE LA STRUCTURE POREUSE DES SOLUTIONS RICHES EN SUCRES ET EN ACIDE CITRIQUE

— STRUCTURE DU PRODUIT PENDANT LA LYOPHILISATION (fig. 1a).

La première phase de la congélation est constituée par la formation de cristaux de glace qui séparent un réseau interstitiel de solutions de plus en plus concentrées à mesure que la température diminue. Dans la seconde phase, le réseau interstitiel est lui-même solidifié, soit en formant un eutectique (mélange de fins cristaux de glace et de soluté) à une certaine température, soit par solidification à l'état amorphe lorsque la solution est riche en sucres, acides aminés ou polymères. Pendant la lyophilisation, le front de sublimation se déplace, laissant des « canaux » vides à la place de cristaux de glace. Lorsque la dessiccation n'est pas réalisée à une tem-

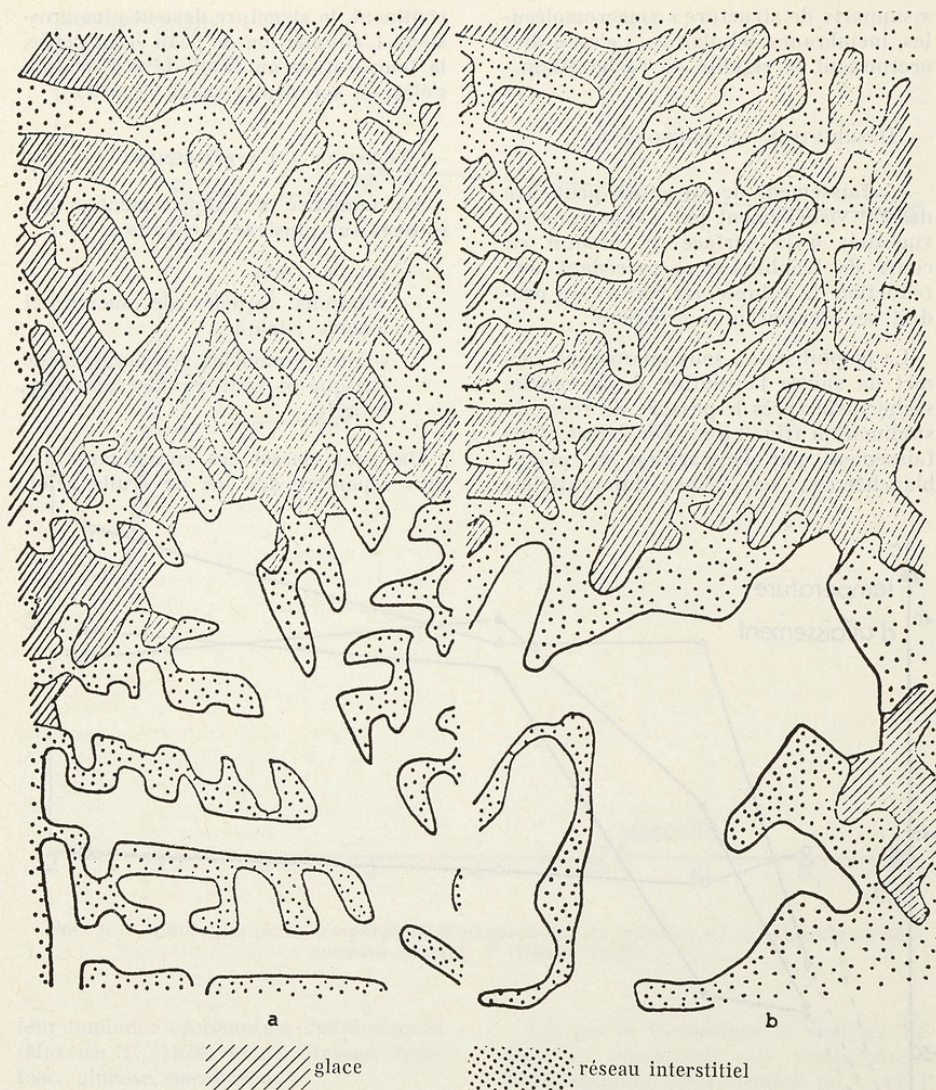


FIG. 1. — Lyophilisation sous le microscope de jus concentré de framboise (extrait sec 40 %).

- a) la préparation est maintenue à -45°C . Le réseau interstitiel rigide, ne se déforme pas après le passage du front de sublimation ;
 b) la préparation est maintenue à -40°C . Les travées de matière sèche confluent après la sublimation de la glace.

pérature suffisamment basse, la texture poreuse du produit lyophilisé est altérée (affaissement de structure ou fusion).

L'affaissement de structure se produit principalement avec des liquides ne contenant pas de molécules ou de systèmes

« supports de structure » (macromolécules, membranes cellulaires...) c'est-à-dire accroissant la rigidité de l'échantillon.

— DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE.

L'affaissement de structure peut être détecté visuellement par l'apparition de rugosités à la surface du produit en cours de lyophilisation, précédant une réduction de volume. La texture du produit sec devient plus grossière.

La lyophilisation sous microscope permet de suivre l'évolution de la couche sèche juste après le passage du front de sublimation (fig. 1 a-b). On détecte l'affaissement par l'apparition de plages blanchâtres ; les veines interstitielles

confluent, la structure devient plus grossière. L'élimination de l'eau étant gênée, la température au front de sublimation s'élève et son déplacement s'accélère.

— TENDANCE A L'AFFAISSEMENT.

La tendance à l'affaissement a été estimée sur plusieurs produits :

- jus de fruits,
- solutions modèles de sucres, et d'acide citrique,
- solutions modèles de sucres, acide citrique et additifs (macromolécules).

On peut classer les constituants les plus répandus des jus de fruits selon

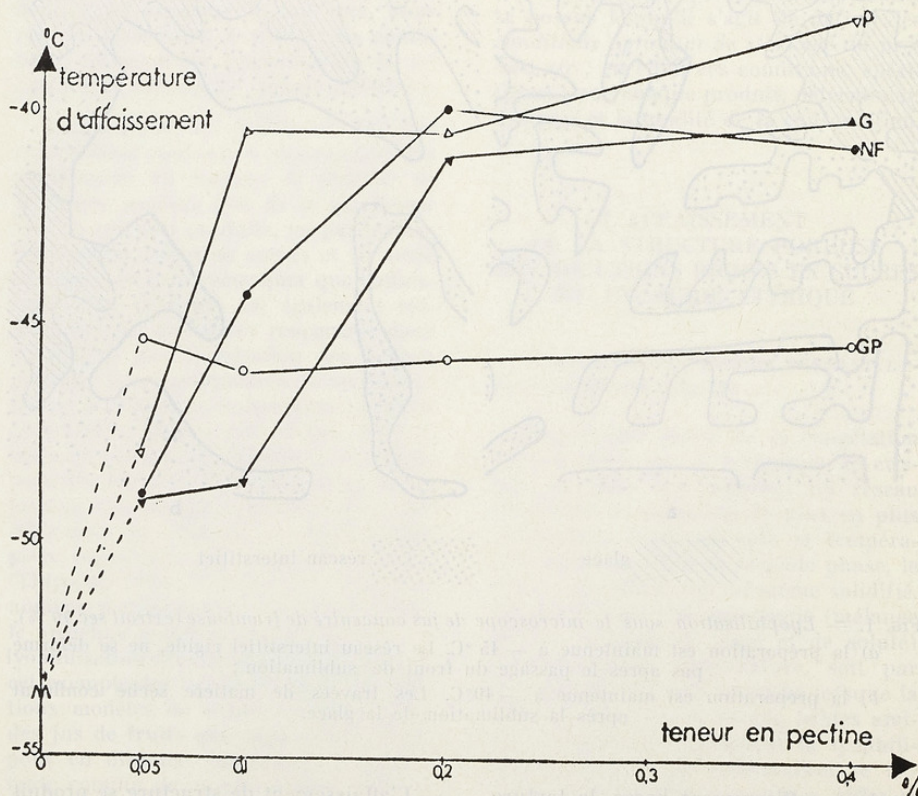


FIG. 2. — Evolution de la température d'affaissement en fonction de la teneur en pectine (d'après F. Diallo, 1976).

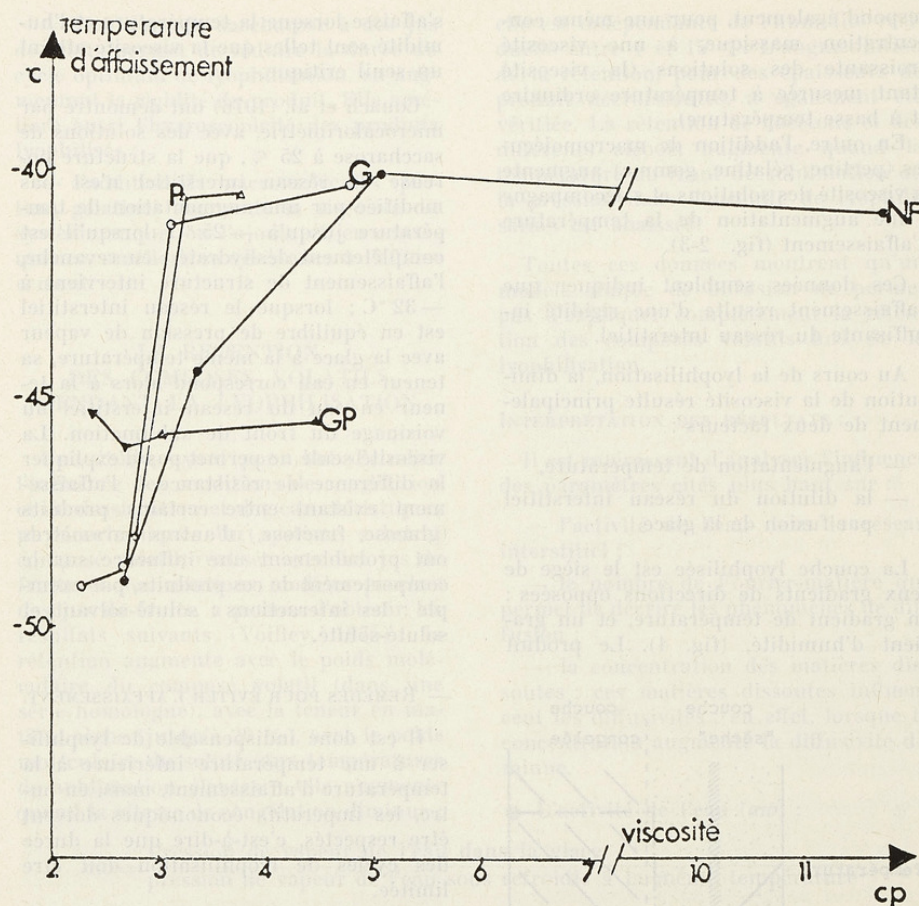


FIG. 3. — Evolution de la température d'affaissement en fonction de la viscosité de la solution (d'après F. Diallo, 1976).

leur tendance croissante à l'affaissement (Moreira T., 1976) acide citrique, fructose, glucose, saccharose.

Constituant	Température affaissement
Acide citrique ..	— 50, — 55 °C
Fructose	— 42, — 45 °C
Glucose	— 42 ± 1
Saccharose	— 31 ± 1

Les jus de framboises de variétés différentes présentent des températures d'affaissement s'échelonnant de — 43 °C à — 31 °C ; ces différences s'expliquent par la proportion variable de leurs constituants, en particulier les sucres, l'acide citrique et les matières pectiques.

— RÔLE DE LA VISCOSITÉ DES SOLUTIONS DANS LE PHÉNOMÈNE D'AFFAISSEMENT.

Le classement précédent (acide citrique, fructose, glucose, saccharose) cor-

respond également, pour une même concentration massique, à une viscosité croissante des solutions (la viscosité étant mesurée à température ordinaire et à basse température).

En outre, l'addition de macromolécules (pectine, gélatine, gomme) augmente la viscosité des solutions et s'accompagne d'une augmentation de la température d'affaissement (fig. 2-3).

Ces données semblent indiquer que l'affaissement résulte d'une rigidité insuffisante du réseau interstitiel.

Au cours de la lyophilisation, la diminution de la viscosité résulte principalement de deux facteurs :

- l'augmentation de température,
- la dilution du réseau interstitiel par fusion de la glace.

La couche lyophilisée est le siège de deux gradients de directions opposées : un gradient de température, et un gradient d'humidité, (fig. 4). Le produit

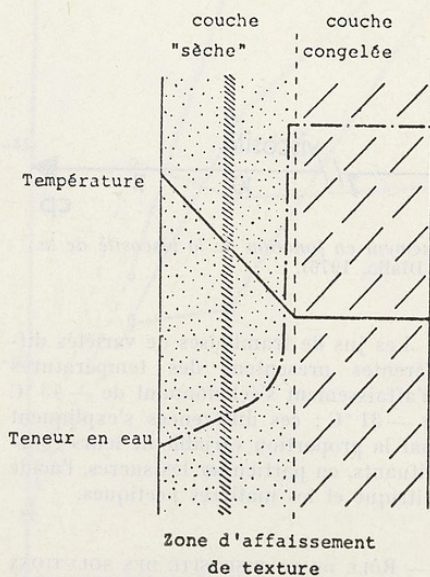


FIG. 4. — Gradients de température et de teneur en eau dans un produit en cours de lyophilisation (d'après Simatos et Al., 1974).

s'affaisse lorsque la température et l'humidité sont telles que la viscosité atteint un seuil critique.

Couach et al. (1976) ont démontré par microcalorimétrie, avec des solutions de saccharose à 25 %, que la structure poreuse du réseau interstitiel n'est pas modifiée par une augmentation de température jusqu'à -25°C , lorsqu'il est complètement déshydraté ; en revanche, l'affaissement de structure intervient à -32°C ; lorsque le réseau interstitiel est en équilibre de pression de vapeur avec la glace à la même température, sa teneur en eau correspond alors à la teneur en eau du réseau interstitiel au voisinage du front de sublimation. La viscosité seule ne permet pas d'expliquer la différence de résistance à l'affaissement existant entre certains produits (glucose, fructose,) d'autres paramètres ont probablement une influence sur le comportement de ces produits, par exemple : les interactions : soluté-solvant et soluté-soluté.

— REMÈDES POUR ÉVITER L'AFFAISSEMENT.

Il est donc indispensable de lyophiliser à une température inférieure à la température d'affaissement, mais, en outre, les impératifs économiques doivent être respectés, c'est-à-dire que la durée des cycles de lyophilisation doit être limitée.

Ceci peut être réalisé grâce à la lyophilisation des échantillons sous formes de particules fines (granulés) ; le brassage continu de ces particules permet de réduire la durée optimum du cycle de lyophilisation. Un stockage à basse température (-45°C) des granulés, avant lyophilisation, favorise la cristallisation de l'eau et permet donc à une proportion plus importante d'eau d'être congelée ; les solutions interstitielles, plus concentrées, seront plus résistantes à l'affaissement, la lyophilisation pourra être réalisée à une température plus élevée et donc plus rapidement.

Quelques additifs ont permis d'augmenter la température d'affaissement :

— l'addition de saccharose à des jus de fruits permet de réduire la durée du cycle optimum de lyophilisation, en augmentant la rigidité du produit. Elle améliore aussi l'hygroscopicité des produits lyophilisés ;

— l'addition de macromolécules (pectine, gélatine) augmente la viscosité du système auquel on l'ajoute et, en conséquence, améliore sa résistance à l'affaissement.

LA RETENTION DES COMPOSES VOLATILS PENDANT LA LYOPHILISATION

Une étude, ayant pour but d'étudier l'influence des conditions de congélation et de dessiccation et des caractéristiques physicochimiques du système substrat composé volatil, réalisée avec des jus de fruits et des solutions modèles proches des jus de fruits, a permis d'obtenir les résultats suivants (Voilley, 1975) : la rétention augmente avec le poids moléculaire du composé volatil (dans une série homologue), avec la teneur en matière sèche (jusqu'à 20 %), avec le poids moléculaire du soluté (aux températures de sublimation élevées) ; elle augmente quand la vitesse de congélation diminue ;

$$aw = \frac{\text{Pression de vapeur de l'eau dans la glace}}{\text{pression de vapeur de l'eau sous refroidie à la même température}}$$

Dans un produit congelé, l'activité de l'eau est indépendante de la nature et de la concentration des produits dissous, elle ne dépend que de la température.

● Le nombre de Fourier-matière est un groupement non dimensionnel représenté par F_0 .

$$F_0 = \frac{Dt}{\Delta \times 2}$$

D : diffusivité.

t : temps pendant lequel la diffusion peut se produire.

Δx : épaisseur d'une plaque, ou rayon d'un cylindre.

On peut utiliser le nombre de Fourier-matière comme une mesure de compen-

sation de grandeur ($D, t, \Delta x$) permettant d'obtenir la même rétention dans des conditions opératoires différentes. Un nombre de Fourier-matière plus faible correspond à une rétention plus importante.

Toutes ces données montrent qu'un modèle simple de diffusion ne permet pas d'expliquer complètement la rétention des composés volatils lors de la lyophilisation.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS :

Il est intéressant d'analyser l'influence des paramètres cités plus haut sur :

— l'activité de l'eau dans le réseau interstitiel ;

— le nombre de Fourier-matière qui permet de décrire les phénomènes de diffusion ;

— la concentration des matières dissoutes : ces matières dissoutes influencent les diffusivités ; en effet, lorsque la concentration augmente la diffusivité diminue.

● L'activité de l'eau (aw) :

Analysons, de façon théorique, l'influence des conditions de congélation et de dessiccation et des caractéristiques physico-chimiques du système sur la rétention.

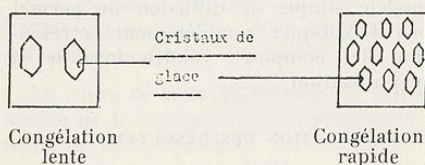
— CONDITIONS DE CONGÉLATION ET DE DESSICCATION.

● Vitesse de congélation.

Pour une même température finale de

congélation, les cristaux de glace sont plus grands, les veines interstitielles plus larges, la vitesse de dessiccation en général plus élevée, pour une congélation lente, que pour une congélation rapide.

Donc, lorsque la vitesse de congélation diminue, Δx augmente, t diminue, en conséquence le nombre de Fourier-matière diminue et la rétention est supérieure.



● *Température au front de sublimation.*

Pour un produit donné, plus la température au front de sublimation est basse, plus l'activité de l'eau est faible ; les veines interstitielles se concentrent. La diffusivité, et donc le nombre de Fourier-matière, diminuent : la rétention doit augmenter. Toutefois, il est probable que la vitesse de dessiccation diminue ; le bilan dépend des conditions opératoires.

● *Traitement thermique.*

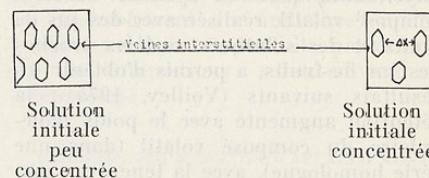
Un séjour prolongé à basse température, par exemple, augmente la proportion d'eau congelée dans l'échantillon,

accroît la concentration et, donc, provoque une diminution de la diffusivité : la rétention est améliorée.

— LES CARACTÉRISTIQUES DU SUBSTRAT.

● *Concentration initiale.*

Pendant la dessiccation, pour une température donnée, de la zone congelée l'activité de l'eau est indépendante de la concentration initiale du produit ; donc la concentration massique des solutions interstitielles est indépendante de la matière sèche, mais, pour une teneur en matière sèche croissante, la largeur des veines interstitielles (Δx) augmente, le nombre de Fourier-matière diminue. On peut donc s'attendre à une augmentation de la rétention des composés volatils avec la teneur en matière sèche initiale.



● *Masse moléculaire.*

La figure 5 représente la rétention d'un composé volatil en fonction de la masse moléculaire du substrat (tous les échantillons ont la même concentration molaire).

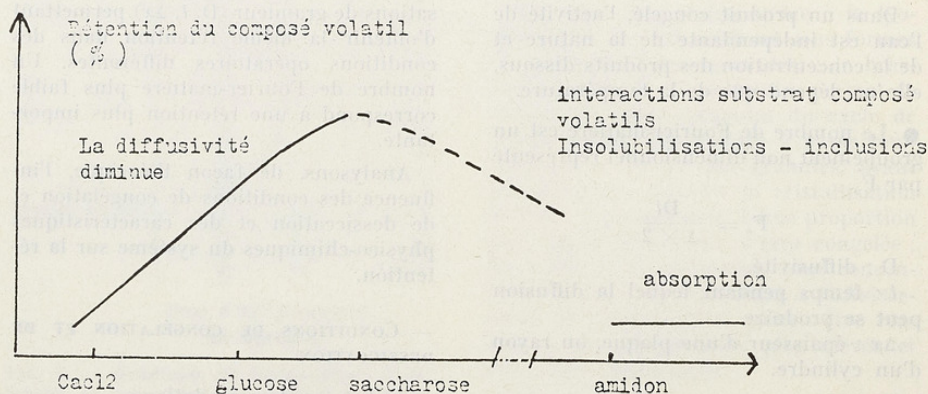
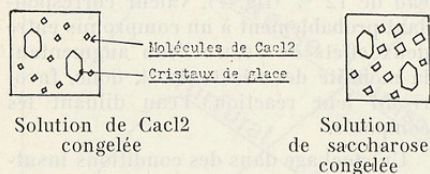


FIG. 5. — Rétention du composé volatil en fonction de la masse moléculaire du substrat (d'après Voilley, 1975).

Dans certains cas, la rétention est différente de la valeur prévue en raison de plusieurs phénomènes : la réadsorption du composé volatil sur le produit sec (CaCl_2 -polymères), l'affaissement de la structure cristalline pendant la lyophilisation (fructose).



— LES CARACTÉRISTIQUES DU COMPOSÉ VOLATIL.

● Concentration initiale.

La rétention de l'acétone, soluble dans l'eau en toutes proportions, diminue quand la concentration initiale augmente.

● Nature.

La rétention dépend de la solubilité du composé volatil dans l'eau et de sa masse moléculaire (modèle de diffusivité sélective).

Nous pouvons donc conclure que la diffusion sélective reste le modèle le plus satisfaisant, à condition de ne pas négliger d'autres mécanismes (réadsorption, interaction, encapsulation).

En se basant sur ce modèle (nombre de Fourier-matière, activité de l'eau, concentration des substances dissoutes), nous avons déterminé les conditions de congélation et de lyophilisation permettant d'éliminer le maximum de solvant d'un produit dont la dissolution avant lyophilisation avait nécessité un mélange d'eau et de solvant non aqueux en proportion (3-1) ; les résultats obtenus ont confirmé les hypothèses de départ et mis en évidence le rôle très important du mode de congélation c'est-à-dire de la texture du produit lyophilisé (la rétention est d'autant plus faible que la congélation est rapide).

Dans le cas des composés organiques lyophilisés, il reste probablement toujours une certaine quantité de solvant résiduel dont l'importance peut être très variable selon les conditions opératoires, et les natures respectives du matériau sec et du solvant. Il semble que, dans tous les cas, la quantité de solvant résiduel est plus faible après lyophilisation que pour les mêmes systèmes séchés par évaporation, la texture poreuse du produit lyophilisé permettant une extraction beaucoup plus rapide du solvant.

L'ÉVOLUTION DU PRODUIT LYOPHILISÉ AU COURS DU STOCKAGE

L'obtention d'un produit satisfaisant juste après lyophilisation n'est pas un critère suffisant lorsque le but de la lyophilisation est la conservation à long terme ; il faut en outre choisir avec soin le conditionnement et les conditions de stockage pour éviter les réactions biochimiques et chimiques néfastes.

Trois facteurs, principalement, influencent l'altération du produit pendant le stockage :

- la teneur en eau,
- l'oxygène,
- la température.

Deux exemples : le jus d'orange, les micro-organismes, vont nous permettre d'étudier l'évolution du produit lyophilisé pendant le stockage.

— LE JUS D'ORANGE.

Les risques d'altération au cours du séchage et du stockage sont particulièrement importants.

Une étude récente (Papanicolaou, 1975) a permis d'analyser certaines propriétés modifiées :

- la teneur en vitamine C ;
- le brunissement d'origine non enzymatique ;
- la flaveur (parfum, arôme, arrière-goût, saveur, texture) ;
- l'apparition de composés volatils (furfural, diacétyl, terpinéol...) ;
- la production de CO_2 dont l'origine est probablement l'oxydation des acides gras.

Les figures 6 et 7 indiquent l'évolution de ces caractéristiques physico-chimiques. Certaines modifications précoces pourraient constituer un indice de début de détérioration du produit sec, et permettre une évaluation de la durée et des conditions de stockage préalablement subies par le produit. En outre, l'évolution de certaines caractéristiques (par exemple, la diminution de la teneur en vitamine C), au cours de tests de détériora-

tion accélérée, pourraient être utilisée pour déterminer la durée optimum de stockage du produit lyophilisé dans des conditions déterminées.

La plupart des réactions accompagnant le brunissement présentent une vitesse maximum pour une teneur en eau de 12 % (fig. 7), valeur correspondant probablement à un compromis entre deux effets de l'eau : l'eau augmentant la mobilité des réactants et, donc, favorisant leur réaction, l'eau diluant les composés.

Un stockage dans des conditions insuffisamment contrôlées risque donc de s'accompagner d'une perte des qualités nutritionnelles et organoleptiques du jus.

— LES MICRO-ORGANISMES.

Le problème de la conservation de micro-organismes lyophilisés a déjà été très étudié.

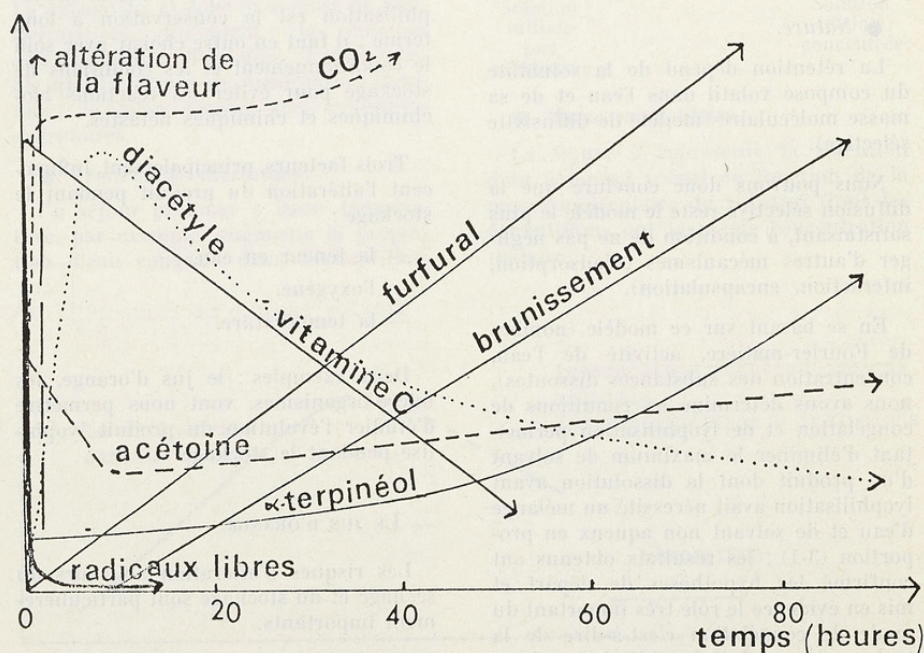


FIG. 6. — Evolution des modifications physicochimiques dans une poudre de jus d'orange (teneur en eau 3,5 %) chauffée à 61 °C.

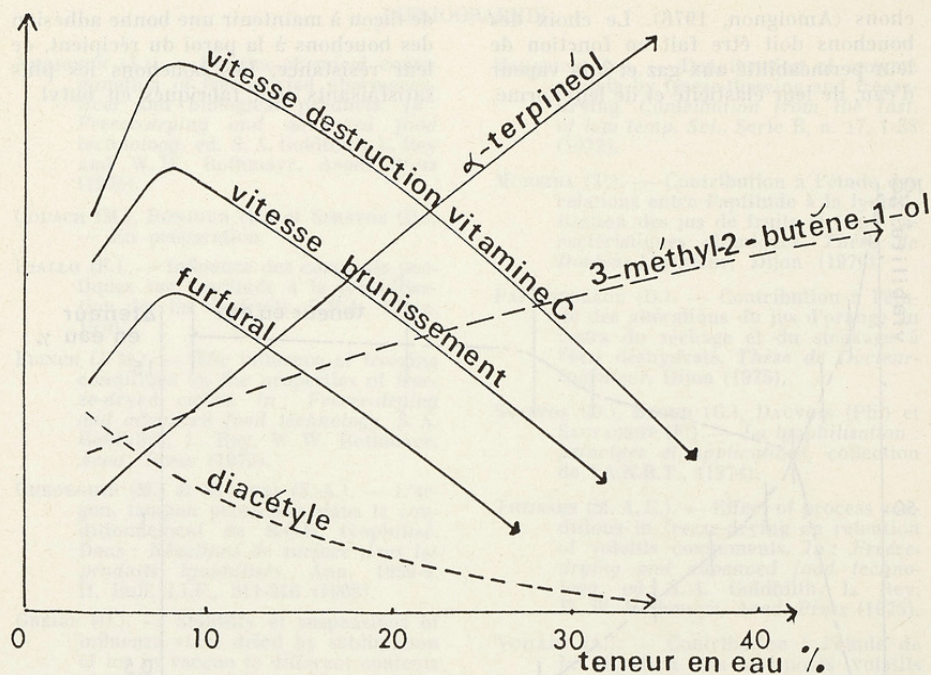


Fig. 7. — Evolution des modifications physicochimiques dans une poudre de jus d'orange en fonction de la teneur en eau (chauffage à 61 °C pendant 7 h).

Une dessiccation trop poussée risque de provoquer des dénaturations protéiques irréversibles. A chaque produit correspond une valeur optimum de l'humidité résiduelle pour le stockage ; un produit très sec est très sensible à l'oxydation ; dans un produit trop hydraté, les réactions chimiques et biologiques sont possibles, le produit évolue rapidement. Le choix de l'humidité résiduelle à atteindre en fin de lyophilisation dépend de l'utilisation que l'on veut faire du lyophilisat (conservation ou utilisation immédiate).

Comme nous l'avons vu, trois facteurs doivent être contrôlés pour assurer la stabilité des préparations :

- Plus la *température de stockage* est basse, plus l'évolution du produit est lente.

- La présence d'*oxygène* est minimisée par le conditionnement des échantillons, soit sous vide, soit sous atmosphère inerte (azote pur, argon, hélium, hydrogène).

Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus avec le vide et l'argon pour le B.C.G. (Ghéorghui, 1969), avec l'hélium et l'hydrogène pour le virus de la grippe (Greiff et al, 1971).

- La *teneur en eau* évolue au cours du stockage, rapidement au début, puis tend à se stabiliser. La figure 8 montre cette évolution de la teneur en eau pendant le stockage et la perte de viabilité qui l'accompagne.

L'évolution de l'atmosphère de conditionnement durant le stockage (humidité, teneur en oxygène) dépend du récipient de conditionnement et surtout des bou-

chons (Amoignon, 1976). Le choix des bouchons doit être fait en fonction de leur perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau, de leur élasticité et de leur forme,

de façon à maintenir une bonne adhésion des bouchons à la paroi du récipient, de leur résistance. Les bouchons les plus satisfaisants sont fabriqués en butyl.

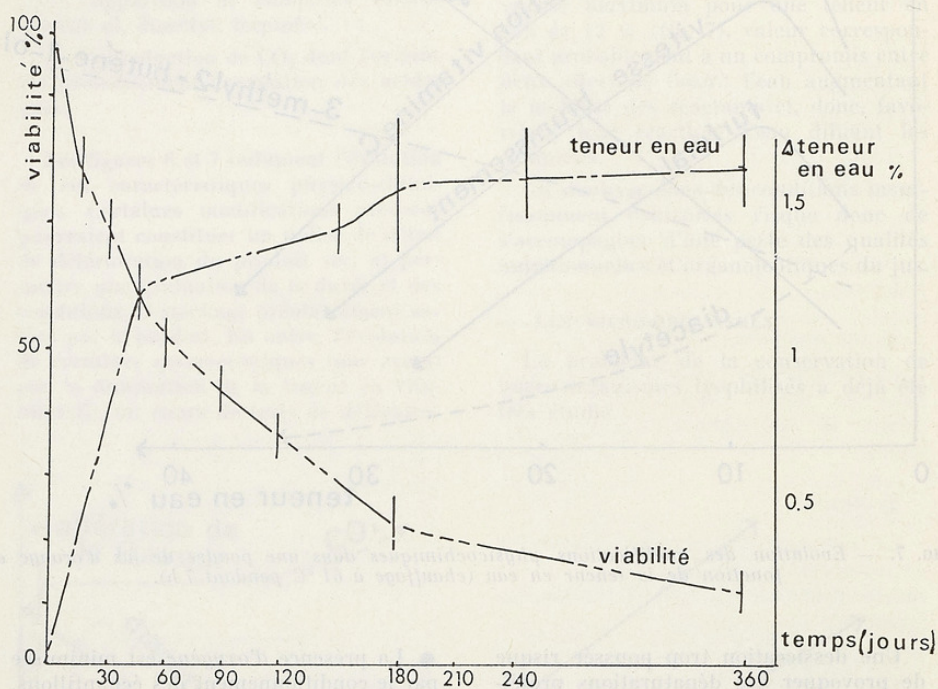


FIG. 8. — Evolution de la viabilité et de la teneur en eau en fonction du temps.

CONCLUSION

Les problèmes que nous venons de décrire sont les principaux problèmes rencontrés dans la lyophilisation des produits biologiques. Nous constatons que la connaissance des caractéristiques physiques et chimiques des substances traitées, et l'analyse de leur comportement, guide la détermination des conditions optimum de lyophilisation et indique les modifications qui peuvent être apportées au produit avant la lyophilisation pour améliorer sa résistance au traitement. La

lyophilisation comporte plusieurs étapes (congélation, sublimation, désorption, stockage). Certaines paraissent particulièrement déterminantes pour le succès du traitement :

- le mode de congélation est responsable de la texture du produit. Or le comportement de l'échantillon pendant la dessiccation dépend essentiellement de sa texture à l'état congelé ;

- les conditions de stockage déterminent la durée et la qualité de la conservation du produit lyophilisé.

BIBLIOGRAPHIE

- AMOIGNON (J.). — Physico-chemical contamination of freeze-dried pharmaceutical and biological products. In : *Freeze-drying and advanced food technology*, ed. S. A. Goldblith, L. Rey and W. W. Rothmayr, Acad. Press (1975).
- COUACH (M.), BONJOUR (E.) et SIMATOS (D.). — En préparation.
- DIALLO (F.). — Influence des composés pectiques sur l'aptitude à la lyophilisation des jus de fruits, D.E.A., Dijon, 1976.
- FLINCK (J. M.). — The influence of freezing conditions on the properties of freeze-dried coffee. In : *Freeze-drying and advanced food technology*, S. A. Goldblith, L. Rey, W. W. Rothmayr, Acad. Press (1975).
- GHEORGHIU (M.) et STURDZA (S.-A.). — L'argon, tampon protecteur dans le conditionnement du B.C.G. lyophilisé. Dans : *Réactions de surface dans les produits lyophilisés*, Ann. 1969-9, II, Bull. I.I.F., 211-216 (1969).
- GREIFF (D.). — Stability of suspensions of influenza virus dried by sublimation of ice in vacuo to different contents of residual moisture and sealed under different gases. *Appl. Microbiol.* 20, 935-938 (1970).
- HANAFUSA (N.). — Denaturation of enzyme protein by freeze-thawing and freeze-drying. *Contribution from the Inst. of low temp. Sci.*, Serie B, n. 17, 1-38 (1972).
- MOREIRA (T.). — Contribution à l'étude des relations entre l'aptitude à la lyophilisation des jus de fruits et leurs caractéristiques chimiques. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Dijon (1976).
- PAPANICOLAOU (D.). — Contribution à l'étude des altérations du jus d'orange au cours du séchage et du stockage à l'état déshydraté. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Dijon (1975).
- SIMATOS (D.), BLOND (G.), DAUVOIS (Ph.) et SAUVAGEOT (F.). — *La lyophilisation : principes et applications*, collection de l'A.N.R.T., (1974).
- THIJSEN (M. A. C.). — Effect of process conditions in freeze-drying on retention of volatils components. In : *Freeze-drying and advanced food technology*, ed. S. A. Goldblith, L. Rey, W. W. Rothmayr, Acad. Press (1975).
- VOILLEY (A.). — Contribution à l'étude de la rétention des composés volatils lors de la déshydratation des produits alimentaires. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Dijon (1975).

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE MÉTALLURGIE INDUSTRIELLE

ANNUAIRE 1977

1977

1977

1977

PRÉSENTATION

La Société Française de Métallurgie Industrielle (S.F.M.I.) a pour objet de promouvoir les échanges d'informations et de connaissances entre les professionnels de la métallurgie industrielle. Elle a été créée en 1964 par la fusion de la Société Française de Mécanique Industrielle (S.F.M.I.) et de la Société Française de Technologie Industrielle (S.F.T.I.).

Elle a pour but de favoriser la diffusion des connaissances techniques et scientifiques, de promouvoir la recherche et le développement, de faciliter les échanges d'informations et de connaissances entre les professionnels de la métallurgie industrielle.

Elle a pour objet de promouvoir les échanges d'informations et de connaissances entre les professionnels de la métallurgie industrielle. Elle a été créée en 1964 par la fusion de la Société Française de Mécanique Industrielle (S.F.M.I.) et de la Société Française de Technologie Industrielle (S.F.T.I.).

Elle a pour but de favoriser la diffusion des connaissances techniques et scientifiques, de promouvoir la recherche et le développement, de faciliter les échanges d'informations et de connaissances entre les professionnels de la métallurgie industrielle.

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

I.T.Q.A.-CAHORS. — 60.655. — Dépôt légal : I-1977
Commission paritaire n° 57.497

La Présidence de la Société, Directeur de la publication, II, Boulevard, D.F. n. 1000
1701-1 - 68.000 - 1977
Commission nationale n. 57.197

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.

