

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)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1967, n° 3 (juil.-sept.)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	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	1967, n° 3 (juil.-sept)
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1967

Collation	1 vol. (71 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	80
Cote	INDNAT (80)
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.80

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
1967 - N° 3

• • •

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES (*)

La Génétique dans la production végétale

I. — Introduction à la Génétique

par M. Henri HESLOT p. 3

II. — Génétique et amélioration des Plantes

par M. Robert MAYER p. 9

III. — Interventions p. 22

Evolution et Progrès des Pompes

Leur adaptation aux applications récentes

par M. Paul BERGERON p. 25

La Cryogénie

par M. Jean-Tony JENN p. 49

ACTIVITES DE LA SOCIETE D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Prix et Médailles attribués pour l'année 1966 p. 65

(*) Voir les résumés des articles en pages 3 et 4 de couverture

Publication sous la direction de M. Jean LECOMTE

Membre de l'Institut, Président

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

44, rue de Rennes, PARIS, 6^e. (Tél. 548-55-61)

Abonnement annuel : 28 F. le n° : 7,50 F. C.C.P. Paris, n° 618-48

Spécimen gratuit sur demande

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

La Génétique dans la production végétale (*)

I

Introduction à la Génétique

par M. HENRI HESLOT

Maître de Conférences à l'Institut National Agronomique

Dans le temps très bref dont je dispose, je ne pourrai faire qu'un survol très général de ce qu'est aujourd'hui la génétique. Cette science est devenue si complexe, et les publications spécialisées si nombreuses, qu'aucun chercheur ne peut maintenant prétendre en suivre le développement dans tous ses détails.

La génétique, ou science de l'hérédité, a véritablement pris naissance en 1865, date à laquelle le moine tchèque Grégor Mendel publia les résultats de ses travaux sur les pois. Bien que certaines expériences aient été faites auparavant par d'autres auteurs tels Camerarius, Köhlerreuter, et les Français Sageret et Naudin, pour chercher à élucider les lois de l'hérédité, on doit à Mendel la première interprétation cohérente des phénomènes.

On sait comment les résultats de Mendel, publiés dans une obscure revue scientifique de Brünn, devaient rester ignorés jusqu'en 1900, date à laquelle ils furent redécouverts par le Hollandais de Vries, l'Allemand Correns et l'Autrichien Von Tschermak.

L'originalité de la méthode de Mendel résulte en l'emploi de couples de caractères simples chez le pois (graines lisses ou ridées, jaunes ou vertes...) dont il suit la transmission en première et deuxième génération et dont il analyse statistiquement la répartition. Il découvre ainsi que certains caractères sont dominants, d'autres récessifs. Il montre que si la première génération est homogène, et du type dominant, les récessifs réapparaissent en deuxième génération dans des proportions bien définies (ségrégation

(*) Conférence prononcée le 21 avril 1966, à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

3 : 1). Mendel propose un symbolisme qui explique ces résultats : tout se passe comme si les caractères héréditaires constituant un couple étaient commandés par des déterminants matériels présents en double exemplaire dans les cellules somatiques, en simple exemplaire dans les gamètes, et se recombinant au hasard au moment de la fécondation.

A partir de 1900, la validité des résultats de Mendel et de ses interprétations est vérifiée par de nombreux auteurs sur un très grand nombre de plantes et d'animaux. Dès 1910, un fait nouveau survient lorsque l'Américain T. H. Morgan commence ses expériences sur un insecte très favorable aux études de génétique, la petite mouche du vinaigre ou *Drosophile*. Son temps de génération est, en effet, inférieur à quinze jours et il est possible d'en élever de très grands nombres dans des bouteilles de faibles volumes.

Aidé par des collaborateurs de premier plan, tels Bridges, Muller et Sturtevant, Morgan isole dans ses cultures un certain nombre de mutants spontanés, caractérisés par la possession de caractères nouveaux (œil blanc, ailes vestigiales...). Etudiant la transmission héréditaire de ces caractères mutants, l'équipe de Morgan découvre que si chacun d'eux obéit bien aux lois de Mendel (pureté des gamètes, ségrégation indépendante), par contre certains couples se transmettent solidairement. On peut ainsi définir des groupes de liaison qui sont au nombre de quatre. Deux mutations appartenant à deux groupes distincts se transmettent de façon indépendante.

Morgan et ses collaborateurs, se rendant très rapidement compte que le nombre des groupes de liaison est égal au nombre des paires de chromosomes de l'espèce ($n = 4$), proposent ce qu'il est convenu d'appeler la théorie chromosomique de l'hérédité. Elle postule que tous les gènes d'un groupe de liaison sont localisés sur un chromosome particulier. Aujourd'hui, avec le recul du

temps et les multiples vérifications faites sur d'autres organismes, on peut dire qu'il ne s'agit plus d'une théorie, mais d'un fait expérimental indiscutable.

En général, les gènes appartenant au même groupe de liaison ne sont pas liés de façon absolue. Ils peuvent se séparer les uns des autres lors du mécanisme complexe de la formation des gamètes (méiose). La probabilité de cette séparation est d'autant plus grande que les gènes sont plus éloignés. Ce fait a permis d'établir des cartes indiquant la position des gènes sur les chromosomes.

Vers 1930, on s'est rendu compte qu'il existait des chromosomes géants dans les glandes salivaires des larves de *Drosophile*. Ils sont striés de bandes transversales dont la distribution est constante. Chacune d'elles a pu être démontrée et repérée. Dès lors les généticiens de la *Drosophile* ont pu, grâce à certaines anomalies chromosomiques, vérifier dans le détail la justesse de la théorie chromosomique de l'hérédité. Dans les cas les plus favorables, certains gènes ont pu être localisés dans des bandes bien définies.

Entre-temps on avait démontré que chez la *Drosophile*, le déterminisme du sexe dépend de chromosomes particuliers, XX chez la femelle et XY chez le mâle. Outre une série de gènes intervenant dans la détermination du sexe, le chromosome X porte un grand nombre d'autres gènes commandant des caractères très variés (couleur de l'œil, forme des ailes...) n'ayant rien à voir avec le sexe. Ces gènes sont transmis selon des modalités particulières, désignées sous le nom d'hérédité liée au sexe.

Au début, les généticiens firent usage, pour leurs études, des mutants d'origine spontanée, mais en 1927, Müller fit la découverte fondamentale que la fréquence des mutations peut être considérablement accrue par irradiation avec les rayons X. On dispose maintenant d'un grand nombre de substances chimiques mutagènes dont certaines sont très efficaces. Néanmoins, il n'est pas encore

possible d'induire la mutation d'un gène déterminé. Il est important de savoir si les mutations sont bien des événements aléatoires qui n'ont en aucune façon le caractère d'une adaptation au milieu. Par exemple, si l'on prend une suspension de colibacilles et qu'on les met en contact avec de la pénicilline, la plupart sont tués. Quelques-uns cependant se développent et forment des colonies constituées de cellules résistantes à l'antibiotique. Les mutants résistants préexistaient-ils dans la suspension ou ont-ils été induits par le contact avec la pénicilline ? La réponse de l'expérience est parfaitement claire : les mutants préexistaient et la pénicilline a simplement joué le rôle d'un crible.

Vers 1940 s'ouvre une nouvelle étape dans le développement de la génétique. A cette date, les Américains Beadle et Tatum ont l'idée d'utiliser un champignon ascomycète, le *Neurospora*. Cet organisme se développe sur un milieu dit minimum ne contenant qu'un sucre, une source inorganique d'azote et quelques vitamines. On peut, toutefois, obtenir des mutants dits biochimiques qui ne peuvent plus pousser sur ce milieu si on ne lui adjoint pas certaines substances de croissance (acides aminés, vitamines, bases puriques et pyrimidiques).

L'analyse génétique de ces mutants permet de démontrer qu'un besoin particulier — par exemple en arginine — dépend de plusieurs gènes distincts et Beadle fut amené à proposer sa formule célèbre : « Un gène — une enzyme ». Selon cette conception, la synthèse d'un acide aminé tel que l'arginine s'opère en plusieurs étapes successives, chacune étant catalysée par une enzyme. Chaque enzyme est sous le contrôle d'un gène particulier. Si le gène mute, l'enzyme correspondante n'est plus synthétisée ou l'est sous une forme inactive.

Dès 1940 ces études de génétique biochimique se sont considérablement développées et ont beaucoup contribué à élucider les étapes du métabolisme intermédiaire. L'introduction d'organismes

à multiplication très rapide comme les bactéries et les virus bactériens (bactériophages) a été aussi un facteur décisif de progrès. On peut aisément manipuler des suspensions bactériennes qui contiennent plusieurs milliards de cellules par centimètre cube et le temps de génération est faible (à 37°, le colibacille se divise toutes les vingt minutes). Par opposition, les plantes supérieures n'ont, en général, qu'une génération par an et je ne parlerai pas des gros animaux !

Au cours des vingt années qui se sont écoulées depuis 1945, la génétique a subi un développement explosif et les barrières qui la séparaient encore de la biochimie ont peu à peu disparu.

C'est ainsi que la nature du matériel héréditaire a été élucidée. Il s'agit toujours d'acides nucléiques, en général de l'acide désoxyribonucléique (ADN) ou quelquefois de l'acide ribonucléique (ARN). La structure de l'ADN a été clarifiée par les études bien connues de Watson et Crick qui ont montré, par la technique de diffraction des rayons X, qu'il s'agissait d'une sorte d'escalier en spirale dont la rampe est constituée par une alternance régulière de groupes phosphates et de sucre et dont les marches sont formées par des bases puriques et pyrimidiques, appariées deux à deux de façon spécifique (Adénine - Thymine, Guanine - Cytosine). Dans une telle structure, l'information génétique doit manifestement être inscrite sous la forme d'un code. Celui-ci ne peut résulter que de la séquence des quatre bases A, G, C, T le long d'une chaîne. En première approximation, un gène peut donc être considéré comme un segment de double hélice d'ADN qui contrôle une enzyme particulière.

La structure des protéines enzymatiques a pu, elle aussi, être élucidée. On sait qu'il s'agit de très grosses molécules, comportant une ou plusieurs chaînes polypeptidiques. Chaque chaîne contient, selon les cas, entre quelques dizaines et quelques centaines d'acides aminés. On appelle structure primaire d'une pro-

téine le nombre de chaînes qu'elle contient et la séquence précise des résidus d'acides aminés qui composent chaque chaîne. Or, les biochimistes ont mis au point (Sanger, 1945) des méthodes permettant de déterminer cette structure primaire dans ses moindres détails.

Dès lors, il devenait possible pour les généticiens de sélectionner des systèmes favorables dans lesquels une enzyme particulière pouvait être isolée et purifiée, le gène de structure correspondant ayant été d'autre part identifié. Ce gène peut être intentionnellement altéré par mutation. On s'est alors aperçu qu'une mutation dans le gène se traduit, en général, par la formation d'une enzyme inactive dans laquelle un acide aminé est remplacé par un autre. Si l'on peut localiser la position de la mutation à l'intérieur du gène, on constate qu'il existe une colinéarité remarquable avec la position de l'acide aminé altéré dans l'enzyme correspondante.

Ces faits ont pu être compris depuis que le mécanisme de la biosynthèse des protéines et la nature du code génétique ont été clarifiés. A chaque triplet de bases (codon) d'un filament d'ADN correspond un acide aminé particulier. Toute altération du codon (remplacement d'une base par une autre) est susceptible d'en altérer le sens et d'entraîner une substitution d'acide aminé. Par la conjonction de méthodes génétiques, chimiques et biochimiques, le dictionnaire génétique est maintenant connu, dans sa presque totalité. Etant donné qu'on peut écrire 64 mots de trois lettres avec les quatre bases A, G, C, T, mais qu'il n'existe par ailleurs que vingt acides aminés essentiels, le code est obligatoirement dégénéré : un acide aminé est en général codé par plusieurs triplets différents.

L'activité d'une cellule vivante est étroitement coordonnée, en fonction des conditions internes et externes et, en particulier, si l'on cultive des bactéries dans des milieux différents, la concentration et la nature de leurs enzymes

varient. Ainsi, quand le colibacille est cultivé dans un milieu sans lactose, les cellules ne renferment que des quantités infimes de l'enzyme β — galactosidase. Dès qu'on ajoute du lactose, la vitesse de synthèse de l'enzyme est multipliée par 10 000. Il s'agit d'un phénomène d'induction très spécifique. A l'inverse existent des phénomènes de répression. L'analyse de multiples exemples d'induction et de répression a conduit Monod et Jacob à proposer un modèle général pour la régulation de la synthèse des enzymes. Sans pouvoir, faute de temps, entrer dans le détail, il nous suffira de dire que le produit primaire du gène est un ARN-messager, copie d'une des chaînes de l'ADN. Cet ARN-m transporte l'information génétique jusqu'au niveau des ribosomes cytoplasmiques où s'effectue la synthèse de l'enzyme. Selon les systèmes, le métabolite en cause, en combinaison avec le produit d'un gène régulateur, favorise ou empêche la synthèse de l'ARN-messager et par conséquent celle de l'enzyme.

L'un des problèmes fondamentaux de la biologie présente est d'expliquer la différenciation cellulaire. Ainsi, chez l'homme, l'œuf fécondé subit une série de divisions et donne finalement naissance à un édifice très complexe où l'on peut identifier au moins 100 types cellulaires distincts. Cependant toutes les cellules sont issues de l'œuf par mitose et doivent donc avoir les mêmes chromosomes et les mêmes gènes. Des faits expérimentaux indiquent que, dans une cellule différenciée, il n'y a en fait qu'une faible proportion de gènes fonctionnels, mais ces gènes ne sont pas les mêmes dans les différents types cellulaires d'un même organisme. Les généticiens tentent d'expliquer pour quelle raison et le problème de la différenciation cellulaire les occupera sans doute pendant les trente prochaines années.

Les lois de Mendel et leurs extensions se prêtent bien à l'emploi d'un symbolisme mathématique. Ainsi s'est développée une branche particulière de la science de l'hérédité, connue sous le nom de génétique des populations. Elle étudie

la façon dont varient les fréquences des gènes dans les populations en fonction du mode de reproduction des individus qui les composent, des mutations, de la migration, de la sélection et des variations fortuites dues au hasard. D'importantes applications de cette discipline peuvent être mentionnées tant dans le domaine de la sélection animale que dans celui de l'amélioration des plantes.

On ne peut parler des étapes du développement de la génétique sans mentionner une science voisine, la cytologie, dont le rôle a été particulièrement important. C'est, en effet, l'étude détaillée de la mitose et de la méiose qui a permis de donner un fondement solide à la théorie chromosomique de l'hérédité. Plus tard, des anomalies chromosomiques ont été identifiées (translocations, inversions, etc.) qui ont permis, dans les cas les plus favorables, de localiser les gènes sur les chromosomes. Enfin, on a pu reconnaître l'existence de séries polyploïdes, très fréquentes chez les végétaux. De cette façon ont été résolus de multiples problèmes comme celui de l'origine des blés qui comportent des formes à $2n = 14, 28, 42$. Plus récemment, cette technique a été appli-

quée avec succès à l'espèce humaine. Je n'en veux pour preuve que la détection d'un chromosome supplémentaire dans le cas de mongolisme, ainsi que la clarification de multiples anomalies comme celles affectant les chromosomes sexuels de l'homme.

Bien que la génétique ait mis en évidence le rôle essentiel des chromosomes dans l'hérédité, l'étude du cytoplasme n'a pas été négligée pour autant. De nombreux cas d'hérédité cytoplasmique ont été rencontrés. Il n'est pas encore possible d'en donner une interprétation en tous points cohérente. Néanmoins, il semble bien, dans la plupart des cas, que cette hérédité non chromosomique puisse s'expliquer par la présence, au sein du cytoplasme, d'unités contenant de l'ADN (ou de l'ARN) et douées de continuité génétique. C'est à coup sûr le cas des mitochondries et des chloroplastes. C'est aussi celui des épisomes bactériens, tel le facteur F, qui contrôlent le type sexuel chez ces organismes. Il n'y a donc pas de contradiction de principe entre l'hérédité chromosomique et l'hérédité cytoplasmique. Dans les deux cas, l'ADN semble bien être le vecteur de l'information génétique.

Génétique et amélioration des plantes ()*

par M. ROBERT MAYER

*Directeur de la Station Centrale
de Génétique et d'Amélioration des Plantes
(C.N.R.A.)*

Depuis les premières acquisitions scientifiques en génétique, les relations de cette discipline avec l'amélioration des plantes ont toujours paru évidentes puisque cette dernière a pour but de transformer les végétaux que nous exploitons en leur conférant certains caractères jugés intéressants et qu'ils doivent être capables de transmettre à leurs descendants.

L'être vivant est, en effet, caractérisé par une certaine structure, au niveau anatomique, histologique, cytologique, qui permet de le décrire. La génétique cherche à comprendre comment cette structure se maintient ou se transforme au cours des générations.

Les développements de la génétique classique ont permis d'analyser de façon précise la manière dont certains caractères des parents étaient transmis à leurs descendants. Les moyens de ces études étaient les expériences de croise-

ments. Elles ont abouti à la découverte d'unités héréditaires, les gènes, alignés sur les chromosomes. Cette découverte, qui unissait la cytologie aux expériences de croisement, nous a montré les phénomènes de ségrégation, d'interaction entre gènes, de linkage et explique les recombinaisons par la théorie de l'enjambement ou « crossing-over ». Les différences héréditaires, analysées en termes de gènes, permettent de prévoir la composition des descendance issues de parents porteurs de certains caractères « mendéliens ».

Toute la génétique classique repose donc sur des expériences de croisement confrontées à des observations cytologiques. Son matériel d'étude a été primitivement la plante, puis on a eu recours à des êtres se reproduisant à une cadence plus rapide et faciles à élever dont le type est la mouche du vinaigre, la célèbre *Drosophile* à ventre noir. Mais

(*) Conférence prononcée le 28 avril 1966, à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

les généticiens ne se sont pas arrêtés là. En recherchant pour leurs expériences un matériel de plus en plus adéquat et en découvrant, chez les micro-organismes, champignons, bactéries et virus, des phénomènes de sexualité ou de parasexualité, ils ont été conduits à créer la génétique moléculaire. Cette évolution des connaissances s'est faite en un peu plus de cinquante ans, depuis la redécouverte des lois de Mendel, aux environs de 1900. Elle est donc toute récente.

L'amélioration des plantes, par contre, avec sa technique fondamentale, la sélection, est pratiquée depuis les débuts de la civilisation. Pendant des millénaires, l'homme a pratiqué la sélection en se fondant sur des notions purement intuitives et empiriques, mais avec un succès remarquable. Il a réussi, en effet, à domestiquer, il y a très longtemps, la plupart des espèces que nous exploitons encore actuellement et, dans ces espèces, à distinguer des variétés d'aptitudes diverses, répondant à ses besoins ou à son agrément, à les cultiver et surtout à les conserver, génération après génération, avec leurs caractéristiques. Ses principales techniques ont été : le bouturage, le marcottage et le greffage pour les plantes à multiplication végétative, la sélection massale continue pour les plantes à multiplication sexuée. Cette dernière consiste à repérer dans une culture les plantes paraissant les plus vigoureuses ou les plus intéressantes, à en conserver les graines comme semences, et à répéter cette opération génération après génération. Maintenant encore, nous cultivons des variétés d'origine relativement ancienne, obtenues par ce procédé, ainsi, parmi les plantes potagères, les laitues « Gotte » et « Passion », les haricots « de Bagnolet » et « de Soissons » dont la création remonte au moins au ^{xviii} siècle.

Depuis la fin du ^{xviii} siècle, la sélection est devenue une affaire de spécialiste. Les sélectionneurs cherchent à diminuer la part d'empirisme présidant à la création de leurs variétés. Ils

se rendaient compte, dès l'époque pré-mendélienne, que les progrès de leurs travaux dépendaient de la possibilité de les fonder sur des connaissances scientifiques solides. Celles-ci ne concernent évidemment pas seulement la génétique. Pour améliorer une espèce, il faut savoir comment elle vit, croît et se développe, comment elle puise dans le milieu extérieur, pour réaliser ses grandes fonctions : assimilation, reproduction, comment elle se défend contre les accidents dus au climat, contre les ravages des prédateurs et contre les maladies. Des connaissances précises de physiologie de la nutrition, de la croissance, du développement et de la reproduction, de bioclimatologie, de pathologie doivent être mises en œuvre. Mais les réactions de la plante correspondent à certaines structures et celles-ci doivent être transmises à ses descendants et devenir les caractéristiques de la variété qu'ils composent. C'est dire qu'elles doivent être stabilisées et caractériser, aussi uniformément que possible, tous les individus appartenant à la variété. C'est ici qu'intervient la génétique. Elle nous donne le moyen de réunir et de maintenir, aux moindres frais et avec le plus de sécurité, sur les individus d'une variété, des caractéristiques qui étaient éparpillées dans l'espèce.

L'amélioration des plantes n'est donc pas uniquement de la génétique appliquée. Elle dépend de bon nombre d'autres disciplines scientifiques mais la génétique est, sans conteste, au centre de l'activité du sélectionneur.

Nous verrons tout à l'heure en quoi les connaissances de génétique ont concouru au développement spectaculaire de l'amélioration des plantes. Voyons rapidement si l'inverse s'est produit et si l'amélioration des plantes a été très importante pour le développement de la génétique théorique.

La génétique appliquée aux plantes supérieures est pratiquée dans un but économique. Ce sont ses succès qui, en dernière analyse, ont permis la transformation de l'agriculture moderne. Mais

elle est liée par l'espèce sur laquelle elle travaille. S'il veut améliorer la résistance du Haricot au virus 1, du Pommier à la Tavelure ou créer une rose d'un coloris déterminé, le chercheur doit utiliser une espèce et même des variétés qui lui sont imposées, quelles que soient les difficultés qui en découlent, en étant lié par les propriétés biologiques et les limites de l'objet de son travail. On peut, évidemment, même sur une plante cultivée, découvrir des relations nouvelles, telles que des relations de ploïdie ou les effets de l'hétérosis, faire des études d'évolution des populations ou de cytogénétique et surtout poser des problèmes nouveaux au généticien. Mais, très souvent, les études de génétique faites sur les plantes supérieures, si elles sont indispensables aux progrès de la sélection, n'apportent rien de particulièrement nouveau à la génétique théorique, dans l'état actuel de son avancement ; elles ne font que confirmer, pour une espèce donnée, des connaissances déjà acquises ailleurs. Il est bien évident que l'étude de problèmes théoriques exige le choix d'objets de travail facilitant cette recherche — possédant, par exemple, un faible nombre de chromosomes — des générations se succédant à un court intervalle, des descendance nombreuses peu encombrantes, faciles à élever ou à cultiver.

Voyons maintenant comment l'amélioration des plantes s'est efforcée de bénéficier des progrès de la génétique théorique et quels sont les points des connaissances actuelles, qui lui sont les plus utiles.

L'un des premiers et des plus importants fut la distinction faite par Johannsen entre ce qui, pour un caractère, est héréditaire et ce qui est apparence, entre le génotype et le phénotype, puis les définitions, dues à Bateson, en 1902, de l'homozygotie et de l'hétérozygotie. On put alors établir clairement la différence entre populations génétiquement hétérogènes et lignées pures génétiquement homogènes et montrer l'inefficacité d'une sélection faite à l'intérieur d'une lignée pure, procédé que de nombreuses géné-

rations de sélectionneurs avaient utilisé sans, évidemment, parvenir à un résultat. Un autre point important est l'effet du mode de reproduction, c'est-à-dire l'évolution différente d'une population suivant qu'elle appartient à une espèce autogame ou allogame.

ESPECES AUTOGAMES

La reproduction autogame a pour effet d'accroître l'homozygotie des individus d'une population qui lui est soumise, en sorte qu'on trouve dans la nature les populations d'espèces autogames, sous forme de mélanges d'individus homozygotes ou voisins de l'homozygotie accompagnés d'un faible nombre d'hybrides naturels ou de mutants hétérozygotes. On peut donc raisonnablement envisager d'isoler des individus qui, étant homozygotes, se reproduiront semblables à eux-mêmes et seront à l'origine d'une variété homogène.

Chez ces espèces, on peut, dans une population hybride, issue de croisement, fixer de la même façon des lignées dont les descendants, sauf accident d'hybrides naturels ou de mutation, garderont fixés les caractères des parents que le croisement aura permis de combiner. La plupart des progrès obtenus chez les céréales telles que le Blé, l'Orge, l'Avoine, certains légumes comme les Pois, les Haricots, les Tomates, les Laitues et de nombreuses autres espèces du groupe autogame, sont dus à cette technique.

PLANTES ALLOGAMES

Les plantes allogames, comme la Betterave, le Maïs, la Luzerne, les Graminées fourragères, l'Asperge, le Chou, la Carotte, le Chanvre posent des problèmes très différents. Les individus composant une population de ces espèces, chez lesquels la fécondation est naturellement croisée, sont des hybrides donc des hétérozygotes et toute tentative de

produire des lignées homozygotes par autofécondation forcée est suivie, chez ces plantes, d'une chute de vigueur des descendants qui les rend peu intéressants du point de vue du rendement et peut conduire à la disparition totale des lignées ainsi produites. Cette perte de vigueur est la suite de la consanguinité et appelée phénomène d'« inbreeding ». Lorsque ces lignées, ainsi déprimées, sont rendues à la fécondation croisée et que leurs descendants retrouvent leur état hétérozygote, ils reprennent de la vigueur : c'est le phénomène d'hétérosis. Les individus composant la variété doivent donc être hétérozygotes et leurs caractéristiques doivent être maintenues par des techniques particulières de sélection. La méthode anciennement utilisée était la sélection massale qui s'efforçait, par des choix annuellement répétés, de ne conserver que les individus porteurs de certains caractères importants tout en laissant les autres à l'état hétérozygote, ce qui maintenait à ces populations une vigueur suffisante. La méthode utilisée actuellement a été mise au point à propos de l'amélioration du Maïs mais appliquée, avec diverses variantes, à l'amélioration de nombreuses espèces.

Le Maïs est une plante monoïque dicline : la castration, par enlèvement des panicules mâles et l'autofécondation, par ensachage des épis femelles et apport de l'autopollen, sont très faciles. Les croisements désirables peuvent s'opérer avec la même facilité en apportant le pollen d'une plante choisie comme père sur l'épi de la plante mère.

La méthode consiste à produire à partir des plantes choisies dans certaines populations intéressantes par leurs attitudes, des lignées « inbreed ». Au cours des générations successives d'autofécondation, ces lignées sont sélectionnées pour certains caractères agronomiques intéressants : résistance aux maladies, type de développement, adaptation au climat, etc... Elles sont éprouvées ensuite pour leur attitude en combinaison avec d'autres lignées. Il s'agit d'obtenir, à partir de lignées affaiblies par la consan-

guinité, des hybrides présentant, grâce à l'hétérosis, le maximum de vigueur.

Du point de vue génétique, deux explications sont actuellement données de cet accroissement de vigueur, l'une fait appel à la dominance : la vigueur résulterait de l'accumulation chez l'hybride de facteurs dominants complémentaires, favorables, portés par les parents, l'autre à la superdominance liée à l'état hétérozygote et donc infixable. Il est, d'ailleurs, à la limite, difficile de savoir, dans le cas de gènes étroitement liés ou très nombreux, s'il s'agit pour un caractère donné, de dominance ou de superdominance.

Cette méthode combine, dans une première phase, les possibilités de sélection des plantes autogames à celles, utilisées dans une seconde phase, de l'utilisation de la vigueur hybride. Elle a prouvé son efficacité chez le Maïs et tend à être utilisée pour l'amélioration de la plupart des espèces allogames.

Mais certains obstacles s'opposent souvent à sa généralisation. Les plus connus sont : la difficulté de castrer, chez les espèces à fleurs hermaphrodites, l'impossibilité d'autoféconder chez les plantes autostériles ou les espèces dioïques, l'impossibilité de croiser chez les plantes interstériles, la difficulté de maintenir en culture des lignées, très affaiblies par la consanguinité.

On utilise certaines techniques pour parer à ces difficultés. Ainsi la stérilité mâle permet, chez certaines espèces à fleurs hermaphrodites, de procéder à des croisements sans castration. Cette stérilité peut être due uniquement à des gènes mendéliens et être déterminée parfois par un seul gène dominant ou récessif. C'est le cas, par exemple, de la stérilité utilisée dans la sélection du Tournesol. Lorsque le gène de stérilité est lié à un gène marqueur de couleur, de l'axe hypocotylé, par exemple, on peut déterminer, dès le stade plantule, les plantes qui seront mâle-stériles et, si on veut faire des croisements industriels au champ, éliminer les autres plantes à un stade très précoce.

Une autre forme de stérilité mâle est d'un emploi plus commode parce qu'elle permet d'avoir, d'emblée, de la semence ne donnant que des plantes mâle-stériles. Elle est déterminée, chez ces plantes par la combinaison d'un facteur cytoplasmique et d'un ou plusieurs facteurs mendéliens. Si le facteur cytoplasmique est présent, en même temps que le facteur mendélien à l'état homozygote récessif, par exemple, la plante est mâle-stérile. S'il est en présence du facteur mendélien à l'état dominant, la plante est fertile. Elle l'est également si le facteur mendélien est présent mais le facteur cytoplasmique absent.

Il faut pour se servir de ce type de stérilité en sélection utiliser trois sortes de lignées, deux isogéniques possédant, l'une le caractère cytoplasmique de stérilité et le gène mendélien de stérilité à l'état homozygote récessif, elle est mâle-stérile, l'autre possédant un cytoplasme normal et le gène mendélien à l'état homozygote récessif, elle est fertile. Lorsqu'on la croise avec la première, prise comme mère, les grains produits possèdent le facteur cytoplasmique et les gènes mendéliens de stérilité à l'état homozygote récessif. Ils donneront donc des plantes qui sont, à leur tour, mâle-stériles. Enfin, le troisième type de lignées doit, d'une part produire en croisement avec la lignée mâle-stérile des semences, donnant des plantes mâle-fertiles, donc posséder le gène mendélien de stérilité à l'état homozygote dominant, d'autre part, avoir avec cette lignée une bonne aptitude à la combinaison pour produire des hybrides à fort rendement. Des mécanismes de ce type ont été découverts et utilisés chez un certain nombre d'espèces : l'Oignon, le Sorgho, la Betterave, le Maïs par exemple. Leur déterminisme génique est d'ailleurs parfois plus compliqué, des gènes modificateurs pouvant intervenir. Parfois également des actions physiologiques, dues à la température par exemple, viennent dévier ce mécanisme. Cependant, il représente une commodité précieuse pour l'obtention des hybrides et on cherche à l'utiliser chez certaines espèces auto-

games comme le Blé, l'Orge, la Tomate dans l'espoir de combiner chez elles les facilités de sélection dues à leur autogamie, à un accroissement de vigueur donc de rendement dû à l'hétérosis.

Une autre technique, permettant le croisement sans castration, fait appel à l'auto-incompatibilité sporophytique ou gamétophytique. On sait que, chez de nombreuses espèces (Trèfle, Choux, etc.), les relations de compatibilité entre pollen et ovaire sont déterminées par le jeu d'une série d'allèles dits « allèles de la série S ». Le grain de pollen portant l'allèle *Sn* ne peut développer son tube pollinique sur un stigmate appartenant à une plante dont le génotype comporte *Sn*. La difficulté, dans ce cas, est d'obtenir des lignées « inbreed » par autofécondation. On peut la tourner soit en utilisant certains stades de la fleur où l'auto-incompatibilité s'exprime moins, en pollinisant au stade bouton par exemple, soit en pratiquant des croisements « frère x sœur », leurs génotypes n'ayant pas forcément en commun les mêmes gènes d'incompatibilité. Enfin, chez certaines espèces, comme la Luzerne, l'autopollen germe moins vite que l'allopollen, ce qui permet d'éviter la castration avant croisement.

Chez les espèces dioïques où chaque plante est unisexuée, il est évidemment impossible d'obtenir une homozygotie plus ou moins poussée par autofécondation. Les croisements frère x sœur, de leur côté, ralentissent les progrès de l'homozygotie. Certaines techniques ont été expérimentées dans ce cas. Ainsi, chez l'Asperge, comme chez d'autres espèces d'ailleurs, certaines graines (une sur mille environ) possèdent deux embryons au lieu d'un. L'un des embryons est normal, l'autre présente, d'ordinaire, des aberrations chromosomiques et, dans certains cas (une graine sur cinquante mille environ), est haploïde, c'est-à-dire ne possède que la moitié d'une garniture chromosomique normale. En élevant cette plante haploïde et en la doublant à la colchicine, on obtient une diploïde qui sera obligatoirement homozygote puisque la garniture

génique de ses chromosomes homologues est là.

Malgré la patience nécessaire pour trier des dizaines de milliers de graines, cette méthode paraît séduisante. Malheureusement, les sexes sont déterminés, chez l'Asperge, par la présence d'un hétérochromosome chez le mâle, c'est-à-dire que, chez le mâle, les chromosomes portant les gènes qui déterminent le sexe, sont dissemblables. En doublant le stock chromosomique haploïde, les chromosomes sexuels deviennent semblables et on ne produit que des femelles. Pour obtenir des mâles isogéniques, il faut alors procéder à une série de croisements en retour qui compliquent et allongent les travaux de sélection.

Les espèces à multiplication végétative comme la Pomme de terre ou les Arbres fruitiers, posent, de leur côté, d'autres problèmes. Lorsqu'un individu intéressant a été découvert dans une population, on peut, en principe, le multiplier, semblable à lui-même, par une technique appropriée. Mais l'obtention de cet individu pose des problèmes de sélection aussi difficiles que ceux des plantes allogames. Les clones sont, en effet, issus de plantes en général hétérozygotes. La recherche de caractéristiques génétiques précises ne peut se faire rationnellement qu'en appliquant les techniques de sélection utilisées pour les espèces allogames. Elles ne sont malheureusement guère appliquées actuellement par suite des difficultés d'obtenir et de maintenir des séries successives de générations consanguines, soit par suite de leur affaiblissement excessif soit parce que la durée séparant deux générations est trop grande, chez les arbres fruitiers par exemple. Une meilleure connaissance de la physiologie du développement permettrait sans doute d'abréger ces délais.

LE DETERMINISME GENETIQUE DES CARACTERES

Ce point a une influence considérable sur les méthodes d'amélioration. Les

caractères d'une plante peuvent être à déterminisme simple, voire régis par un seul gène (caractères monofactoriels) soit à déterminisme très complexe, régis par un grand nombre de gènes (caractères polygéniques). C'est ainsi que la pilosité de l'épi de Blé, le type de fleur ou la couleur de la chair du fruit chez la Pêche, la présence ou l'absence de fil chez le Haricot sont monofactoriels. Par contre, la résistance à la race 21 de rouille noire chez la variété de blé tendre Kenya Farmer, est sous la dépendance de six gènes localisés sur six chromosomes différents. Le type de développement hiver ou printemps du blé tendre est sous la dépendance de deux gènes majeurs dont l'action peut être modifiée par quatre autres gènes situés chacun sur un chromosome différent. Lorsque le déterminisme génétique d'un caractère est simple ou relativement simple, l'étude des recombinaisons observées dans les disjonctions, qui se produisent à l'intérieur des générations suivant le croisement, est possible et permet, même avec un nombre de plantes étudiées relativement modeste, de trouver de nouveaux types recherchés par le sélectionneur. Il faut, toutefois, que les liaisons génétiques entre caractères intéressants et caractères peu désirables ne soient pas trop étroites et puissent être brisées. Ce problème de liaison entre gènes déterminant certains caractères est très important et on peut dire que l'une des principales occupations du sélectionneur est de chercher à briser des « linkages » non souhaitables.

C'est ainsi que la recherche de variétés de melons résistantes à l'Oïdium a conduit à croiser une variété américaine résistante : P.M.R. 6 avec des lignées de Cantaloup charentais sensibles. Les plantes résistantes, issues de ce croisement, étaient toutes sensibles à une nécrose (Crown blight) d'origine physiologique, affectant les feuilles de base. L'explication de ce phénomène est, soit qu'il existe deux gènes, très voisins sur le même chromosome, contrôlant, l'un la résistance à l'Oïdium, l'autre la sensibilité à la nécrose basale ou que l'on ait

affaire à un seul gène à effet pleiotrope. S'il s'agit de linkage, le problème revient à briser cette liaison par un crossing-over bien placé, s'il s'agit d'un gène à effet pleiotrope, il faut s'efforcer de découvrir et d'introduire dans le génome des plantes intéressées un gène modificateur conservant la résistance à l'Oïdium mais modifiant la réaction à la nécrose basale. Notre ignorance sur la nature de la liaison entre les deux caractères : résistance à l'Oïdium et sensibilité à la nécrose basale, tient au faible « pouvoir de résolution » des expériences de croisements entre plantes supérieures. Plus nombreux sont les descendants d'un croisement, plus on a de chances de découvrir parmi eux l'individu rare porteur d'une recombinaison résultant d'un crossing-over entre locus rapprochés sur le même chromosome. Ces études peuvent se faire à l'aide de la *Drosophile* ou de micro-organismes, tandis que sur melon de serre, cultivé à raison de deux plantes au mètre carré, il faudrait des surfaces et des moyens sans rapport avec ceux d'une station d'amélioration des plantes.

Lorsque l'analyse se fait sur plantules, elle peut parfois être poussée davantage. C'est ainsi qu'on pensait que la liaison existant entre la teinte noire des graines chez le Haricot et la présence d'anthocyane sur l'axe hypocotylé des plantules qui en étaient issues, était absolue. Des croisements à descendance suffisamment nombreux ont montré que cette liaison pouvait être brisée et que des plantules combinant la teinte noire du grain et l'absence d'anthocyane apparaissaient. Ces caractères ne dépendent donc sans doute pas du même allèle mais de gènes différents occupant des locus très rapprochés. On voit par là que les unités héréditaires que les auteurs en amélioration des plantes qualifient de gènes pour plus de commodité, sont souvent en réalité des unités complexes correspondant à des segments de chromosomes comprenant plusieurs locus capables de se recombiner ensemble, c'est-à-dire à des unités de recombinaison.

En fait, ce que nous appelons gène et qui est, en principe, l'unité de recombinaison de base, c'est-à-dire le segment de chromosomes à l'intérieur duquel aucun « crossing-over » ne peut se produire, correspond soit à cette définition, soit à un bloc de locus unis par linkage et qu'une analyse à fort pouvoir de résolution pourrait briser, soit parfois même à un chromosome entier. On connaît actuellement trop peu de choses sur les unités de recombinaison dans les diverses espèces de plantes supérieures pour qu'aucune opinion générale puisse être émise à ce sujet. Mais le point principal sur lequel le sélectionneur doit porter son attention est l'unité de ségrégation, qui peut varier de temps à autre dans ses dimensions physiques et qui, au stade actuel de nos connaissances, chez les plantes supérieures, ne doit pas être définie avec trop de précision, par suite de la difficulté que nous avons d'établir des analyses génétiques suffisamment fines.

Tous les linkages ne sont évidemment pas indésirables, certains sont même très recherchés tels que ceux où entrent les gènes marqueurs. Nous en avons donné un exemple précédemment, en parlant de la stérilité mâle du Tournesol. Ces gènes correspondent souvent à des caractères morphologiques, faciles à voir et qui permettent le contrôle commode du mode de transmission de caractères difficiles à détecter ou ne pouvant l'être qu'à un stade tardif du développement de la plante, comme certains caractères physiologiques.

Malgré les limites mises à la recombinaison par les liaisons de caractères dues au « linkage » ou à la pleiotropie et par l'existence de ce qu'on appelle des liaisons physiologiques comme celles existant entre la tardiveté et la richesse en fécule chez la Pomme de terre ou en huile chez le Colza, la sélection par combinaison est actuellement à la base de toutes les méthodes de sélection. L'une de ses variantes : la sélection par rétrocroisement ou par « back-cross »

rend de grands services lorsqu'il s'agit de conférer à des variétés cultivées certains caractères à hérédité simple tels que des résistances aux maladies, portés par des populations primitives ou sauvages. Supposons qu'une lignée soit porteuse d'un tel caractère et que l'on désire l'introduire dans une variété déjà améliorée dite variété récurrente en conservant à celle-ci ses caractéristiques. On croise des plantes appartenant aux deux lignées parentales et on recroise à leur tour les descendants obtenus qui sont porteurs du caractère désiré, avec le parent récurrent. Après un certain nombre de ces croisements, on obtient des descendants porteurs du caractère puisqu'ils ont été sélectionnés dans ce but à chaque génération de croisement mais qui, génétiquement, sont très proches du parent récurrent.

Ces méthodes de sélection par combinaison ont permis d'obtenir de nombreux succès de sélection mais n'ont pas répondu entièrement aux espoirs que les sélectionneurs d'il y a quarante ou cinquante ans, avaient mis en elles. Manipuler des caractères à déterminisme génétique simple dans un programme de sélection et obtenir économiquement des différences de teinte chez certaines plantes ornementales, la résistance à certaines races pathogènes ou des formes de gousses particulières chez le Haricot, sont devenus des exercices relativement faciles. Malheureusement de nombreux caractères, très importants en agronomie ne sont pas à déterminisme simple et constituent ce qu'on appelle d'ordinaire des caractères quantitatifs.

Ces caractères, qui sont souvent mesurables, présentent dans les populations paternelles une fluctuation continue autour d'une moyenne et donnent, à la F_2 du croisement, une courbe de variation des mesures apparemment continue. Cette dernière caractéristique est très importante pour le généticien.

Deux attitudes peuvent être observées dans l'étude de ces caractères :

La première consiste à en faire l'analyse, c'est-à-dire à les répartir en sous-caractères dans l'espoir que leur contrôle génétique se répartirait de la même manière et que les sous-caractères manifesteraient un déterminisme génétique plus simple, donc plus facile à étudier.

Prenons un exemple : la précocité de floraison chez le Blé est un caractère quantitatif. Lorsqu'on croise une lignée précoce et une lignée tardive, l'hybride de première génération a d'ordinaire une précocité de floraison intermédiaire entre les parents. A la F_2 , la disjonction donne une variation continue entre la précocité des parents et parfois la dépassant dans le sens de la précocité ou de la tardiveté.

En étudiant la physiologie du développement du Blé, on a pu montrer que le temps nécessaire à la plante pour parcourir le chemin allant de la levée à la floraison, se décomposait en trois phases dont la durée respective conditionnait ce temps. La première, une phase de croissance est en relation directe avec la température, elle va de la levée au stade A, c'est-à-dire à l'apparition des premières ébauches d'épillets. La seconde dépend de la longueur du jour et d'un seuil de température. Elle va du stade A au stade B, c'est-à-dire à l'apparition des premières pièces florales. La troisième, liée à la température, va du stade B à la floraison. L'analyse génétique de la phase AB qui détermine si un blé est d'hiver, alternatif ou de printemps, a permis de voir qu'elle est sous la dépendance de deux gènes principaux et de quatre modificateurs. Elle est soumise à un déterminisme relativement simple. On peut donc prévoir une méthode de sélection précise en ce qui la concerne. L'ensemble du caractère « précocité d'épiaison » reste évidemment un caractère quantitatif.

Une autre attitude est fondée sur des études de génétique quantitative. Leur base a été fournie il y a plus de cinquante ans (1911) par Nilsson-Ehle, à propos de ses expériences concernant la couleur des grains chez les céréales. Il

analyse de nombreux croisements entre variétés à grains de couleur différente, par exemple entre variétés de blé à grains roux et blancs. Dans certains cas, les disjonctions observées étaient monofactorielles, dans d'autres les proportions étaient de 15/1, 63/1 et même 255/1. Il y avait de nombreux passages entre une ségrégation par classes bien définies et une variation continue. Nilsson-Ehle admit qu'un seul caractère, la teinte rouge du grain de blé, pouvait être déterminé par plusieurs gènes. En fait, il s'agit de trois facteurs à effets additifs et à dominance incomplète déterminant, à l'état dominant, la teinte rouge du grain, c'est-à-dire que le grain est d'autant plus rouge que plus de facteurs sont présents.

Cette théorie est confirmée par le fait qu'il est possible, pour divers caractères quantitatifs, d'obtenir, après croisement, dans la descendance, des classes numériquement constantes. Si les parents sont très différents pour le caractère étudié, les classes se disposent de façon intermédiaire entre les parents. S'ils sont, au contraire, voisins, on observe ce que les auteurs appellent des « transgressions » positives ou négatives, c'est-à-dire que les parents ne représentent pas les extrêmes de la variation possible mais que certaines classes manifestent le caractère à l'état plus accusé. L'interprétation que l'on peut donner de ce fait est que le caractère qualitatif est conditionné par un nombre constant de gènes à effet additif, qui se recombinent entre eux et dont les parents portent chacun une série. Ces gènes ont reçu de Lang le nom de gènes polymères et le mécanisme de leur action le nom de polymérie. L'hypothèse de Nilsson-Ehle suppose que les gènes ont une action non seulement additive mais encore indépendante. En fait, elle n'est pas toujours satisfaite. L'action des gènes peut avoir des effets extrêmement différents, elle n'est pas toujours additive mais peut être complémentaire, les relations de dominance peuvent varier, les interactions génomiques sont souvent complexes.

En 1943, Mather introduisit la notion d'hérédité polygénique, caractérisée par une ségrégation mettant en cause un très grand nombre de gènes déterminant le caractère étudié. Ils sont à action discrète et suffisamment proches l'un de l'autre pour qu'il ne soit pas possible de traiter chaque gène comme une entité distincte. Ces polygènes sont cependant transmis de la même manière que les gènes majeurs. Ils ségrégent, se combinent, entrent dans les systèmes de linkage, manifestent des dominances et des interactions. En bref, ils jouissent de la même gamme de propriétés dans l'action et la transmission que les gènes à action majeure. Les effets d'une substitution allélique à chaque locus sont sans grande importance comparés à la variation totale du caractère. Les effets phénotypiques de la substitution sont interchangeables, ce qui veut dire que des phénotypes identiques peuvent être déterminés par des génotypes différents.

Un grand nombre d'auteurs parmi lesquels Mather, Lowny, Harvey, Kempthorn, Hull, Haymann, ont recherché des méthodes d'étude de ce matériel génétique. Elles tiennent compte de la difficulté devant laquelle nous sommes de reconnaître et de suivre des gènes individuels et, grâce à l'analyse biométrique appropriée des relations statistiques entre parents et descendants, elles cherchent à répartir la variation phénotypique observée, en ses composantes génétique et non génétique. La première peut, à son tour, se décomposer en effets additifs des gènes, en effets de dominance, en effets d'interaction non alléliques de divers genres et en effets d'interaction entre le génotype et le milieu.

Les principales conditions d'utilisation de ces méthodes sont que l'échelle de mesure choisie soit légitime, c'est-à-dire que l'action des gènes conditionnant le caractère s'y manifeste de façon additive et qu'il y ait indépendance entre les gènes et le milieu, celui-ci manifestant son action de façon homogène sur l'ensemble des gènes. L'échelle de mesure dans laquelle seront effectués les calculs,

une fois choisie, il faut s'assurer que la détermination des moyennes et des variances aléatoires ne soit pas biaisée. On peut alors, en utilisant des croisements diallèles et en comparant, pour le caractère étudié, les résultats des mesures obtenues chez les parents, à ceux des F_1 , entre F_1 , à ceux des F_2 , entre parents et F_2 , décomposer la variance globale et mesurer la dominance. En faisant intervenir la F_3 , on peut mettre en évidence l'existence de linkages, calculer le nombre de gènes en cause et déterminer des taux de transgression favorables. Ces derniers permettent de voir s'il est possible de tirer, du croisement étudié, une meilleure expression génotypique du caractère en cause que celle existant chez les parents. La théorie de la génétique biométrique est maintenant bien développée, les méthodes d'analyse sont bien connues.

Mais étudier sur le papier, à l'aide de croisements diallèles, des méthodes d'approche pour la sélection des parents inté-

ressants en croisements est une chose et réaliser dans la pratique les essais exigés par cette méthode en est une autre. L'une des principales difficultés de ces techniques, par elles-mêmes très séduisantes, réside dans la transposition sur le terrain des essais exigés par la théorie. Des résultats intéressants ont été obtenus par ces techniques, ce qui a vérifié leur intérêt et, en gros, l'exactitude des hypothèses qui leur servent de base, mais la principale pierre d'achoppement en est la réalisation pratique.

*
*
*

Nous venons de voir, dans ce qui précède, en quoi les connaissances de génétique aident le sélectionneur à utiliser des méthodes d'amélioration moins empiriques, adaptées aux différents types de plantes. Nous allons voir maintenant ce qu'elles lui apportent pour augmenter la variabilité génétique, sans laquelle aucune sélection n'est possible.

AUGMENTATION DE LA VARIABILITE GENETIQUE

L'amélioration ne s'exerce pas sur une plante individuelle mais sur les populations constituant sa descendance à chaque génération en essayant, par des méthodes diverses, d'influer sur la structure de leur génotype moyen pour qu'après un certain nombre de générations on ait éliminé les caractères paraissant défavorables et conservé les caractères favorables. Toute amélioration génétique résulte donc de choix dans une population et se ramène finalement à un acte de sélection. Pour qu'il puisse y avoir choix, il faut que nous disposions de populations hétérogènes, renfermant des individus héréditairement différents les uns des autres. Lorsque cette hétérogénéité n'existe pas ou est insuffisante,

on la crée ou on l'augmente. Deux techniques se présentent à nous pour cela : le croisement, l'induction de mutations.

LE CROISEMENT

Pour qu'un croisement soit efficace, en sélection, il suppose le choix de géniteurs intéressants, c'est-à-dire porteurs des caractères que l'on désire réunir dans la variété. Pour les trouver, le sélectionneur a à sa disposition les collections mondiales existant dans les instituts de recherche. Certains pays ont des organisations chargées spécialement de l'introduction de nouveautés. Les

caractéristiques des plantes introduites sont étudiées puis publiées régulièrement. La F.A.O., elle aussi, s'est préoccupée de ce problème et a essayé de créer des stations de collection et de conservation du matériel génétique. Des techniques de conservation de semences permettent de maintenir très longtemps dans leur état primitif des populations qui risquent de disparaître devant l'avance des variétés sélectionnées. Ces collections sont alimentées par les récoltes faites au cours de prospections dans les zones de diversifications de l'espèce étudiée.

Lorsque le géniteur adéquat existe dans l'espèce à laquelle appartient la variété, on peut calculer les chances de recombinaison des caractères que l'on désire rassembler et par conséquent prévoir les dimensions des populations hybrides à étudier. Lorsqu'il s'agit de croisements interspécifiques ou intergénériques deux cas peuvent se présenter :

Des études préalables ont montré que l'espèce sur laquelle on travaille est polyploïde ou non.

Une espèce est polyploïde lorsque les individus qui la composent renferment dans leur noyau plusieurs stocks chromosomiques ou, comme on dit, plusieurs génomes. Ces génomes peuvent avoir la même origine, on parle alors d'autopolyploïdes ou des origines différentes, on a alors affaire à des allopolyploïdes.

Prenons l'exemple du blé tendre. Cette espèce possède 21 paires de chromosomes, se répartissant en trois génomes de sept paires. Or, il existe dans la nature des blés, dont certains sont cultivés, les blés durs par exemple, possédant deux génomes de sept chromosomes. Ces génomes ont été désignés par les lettres A et B. Des travaux de cytogénétique nombreux ont montré que le blé tendre résultait d'hybridations entre un blé porteur des génomes A et B et une autre graminée *Aegilops squarrosa* apportant le troisième génome, le génome D (Kihara, Mc Fadden, Sears). En 1946, Mc Fadden

et Sears, obtinrent un hybride entre un blé à 2 génomes et *Aegilops squarrosa*. En doublant par la colchicine le stock chromosomique de la F_1 , qui renfermait les trois génomes A, B et D, mais qui était stérile, ils obtinrent une forme fertile, très voisine de l'épeautre. De plus, il y avait une formation régulière de bivalents à la méiose chez les hybrides obtenus par croisement entre l'épeautre synthétique et les blés tendres naturels et ces hybrides étaient fertiles. On entreprit alors, dans de nombreux instituts, de refaire la synthèse du blé tendre, avec l'espoir qu'en choisissant convenablement les lignées de blé à deux génomes et *Aegilops* on pourrait créer des géniteurs capables d'apporter des gènes nouveaux et intéressants aux variétés cultivées.

Ces études sont encore en cours. Elles sont importantes, surtout pour des recherches de résistances à certaines maladies que l'on ne trouve pas chez le blé tendre. C'est ainsi qu'on recherche par cette voie à Versailles, des géniteurs de résistance à deux maladies du Blé : le piétin-verse et la Fusariose, qui, avec les nouvelles techniques de culture et les assolements céréaliens intensifs qui caractérisent la production en France, sont devenues très dangereuses. On a recours pour cela à des croisements avec des lignées du blé d'Ethiopie qui est tétraploïde, c'est-à-dire à deux génomes et *Aegilops ventricosa*, tous deux peu sensibles au piétin et à certaines lignées de blé dur peu sensibles à la Fusariose.

Les croisements avec les lignées de blé d'Ethiopie sont, en particulier, très prometteurs, parce qu'ils permettent, non seulement de briser la liaison physiologique existant entre la résistance au piétin et la tardiveté, mais encore d'introduire de surcroît des résistances à la rouille noire et jaune.

Ces tentatives sont, d'ailleurs, faites également chez d'autres espèces allopolyploïdes. C'est ainsi qu'on a réussi à créer des colzas synthétiques en croisant le Chou et la Navette.

Dans d'autres cas, les croisements interspécifiques n'ont pas pour but de refaire la synthèse d'une espèce mais de procéder à l'introggression dans une espèce, de caractères favorables se trouvant dans une autre espèce, dans le but de créer des géniteurs nouveaux et intéressants. Il s'agit de n'introduire dans le génome de l'espèce à améliorer que le chromosome ou le fragment de chromosome porteur du gène recherché.

Dans cet ordre d'idées, à la station d'amélioration des plantes de Clermont-Ferrand, un travail de sélection dans le Chientent *Agropyrum intermedium* a permis à M^{me} Caudéron d'obtenir des lignées résistantes aux rouilles jaune, noire et brune. Croisées avec le blé tendre, elles ont donné un hybride qui, doublé à la colchicine, a permis de produire un amphidiploïde à 56 chromosomes, 42 provenant du Blé et 14 du Chientent, parfaitement stable, perenne et résistant aux trois rouilles. Il possède malheureusement trop de caractères « Chientent » peu intéressants pour la culture. A partir de ce croisement, elle a pu isoler également deux lignées dites « d'addition » à 44 chromosomes, dont 42 viennent du Blé et 2 du Chientent. Ces lignées sont résistantes l'une à la rouille noire, l'autre à la rouille brune, ces résistances étant apportées par la paire de chromosomes de Chientent.

L'introduction de cette paire supplémentaire de chromosomes amène cependant avec elle, en même temps que des résistances intéressantes, un certain déséquilibre physiologique qui se traduit par certaines caractéristiques, en particulier un rendement moins élevé que celui du blé tendre ayant servi de géniteur. On est alors parvenu, grâce à certaines techniques particulières, à créer des lignées dites de « substitution » dans lesquelles une paire de chromosomes du Blé est remplacée par une paire de chromosomes du Chientent. On peut même aller encore plus loin et tenter, en brisant le chromosome venant de l'espèce ou du genre étranger à l'aide des rayons

X par exemple, de remplacer un fragment de chromosome du Blé par un fragment du chromosome étranger porteur du gène à introduire, et réaliser ainsi une véritable opération de microchirurgie comme l'a fait Sears sur un hybride entre blé tendre et *Aegilops*.

*
**

Les voies d'augmentation de la variabilité du matériel de sélection dont je viens de parler sont toutes basées sur le croisement. Il en existe d'autres basées sur le changement du patrimoine héréditaire par mutation.

On range d'ordinaire, sous le nom de mutation, en amélioration des plantes, toute une série de phénomènes, très différents les uns des autres et qui vont depuis les remaniements génomiques ou chromosomiques jusqu'aux mutations au sens strict, c'est-à-dire aux mutations géniques correspondant à un changement d'allèle.

POLYPLOIDIE

Nous avons vu qu'il existait des espèces dont les individus au lieu de renfermer dans leur noyau un nombre diploïde de chromosomes, contiennent davantage de génomes : trois chez les triploïdes, quatre chez les tétraploïdes, etc. Il est possible d'obtenir, à partir de plantes normalement diploïdes, des polyploïdes, par action de différents agents ayant la propriété d'empêcher la formation du fuseau à la mitose en sorte que le noyau se reconstitue avec $4n$ chromosomes à partir de noyaux à $2n$. On peut ensuite obtenir des plantes à $3n$ en croisant des diploïdes et des tétraploïdes. L'agent le plus utilisé pour produire cet effet est la colchicine. En traitant une plante par cet alcaloïde à des doses soigneusement étudiées, en l'appliquant en particulier sur des méristèmes, on obtient des massifs où les cellules di-

tétra- ou même octoploïdes sont en mélange. Il est possible, à partir de ces massifs, d'obtenir des bourgeons floraux donnant des gamètes à $2n$ chromosomes ou davantage. Il est parfois possible aussi d'isoler ces massifs, par greffage par exemple. Les individus ainsi obtenus sont des autopolyploïdes. Nous avons vu, précédemment, comment on pouvait obtenir des allopolyploïdes par un procédé parallèle et le rôle joué par ce type de recherche dans l'obtention des géniteurs.

Les autotétraploïdes artificiels, eux aussi, présentent dans certains cas des avantages. Ils ont, en général, des organes végétatifs plus développés que les diploïdes correspondants : des feuilles plus grandes et plus épaisses, des tiges plus grosses, de plus grosses graines. Malheureusement, l'homologie de leurs génomes conduit souvent à des méioses anormales et à une certaine stérilité, ce qui diminue leur intérêt chez les espèces cultivées pour la graine. Par contre, chez celles cultivées pour leur appareil végétatif, ces variétés peuvent apporter un progrès. C'est le cas, par exemple, chez les Raygrass, les Trèfles blanc et violet où les variétés tétraploïdes ont des rendements supérieurs aux diploïdes dont elles sont issues.

On sait que, chez la Betterave diploïde, il existe une corrélation statistique négative entre le poids et la teneur en sucre des racines. Cette corrélation a pu être brisée grâce à la polyploïdie dans ce sens que chez les betteraves triploïdes les racines sont plus grosses que chez les diploïdes sans diminution de la teneur en sucre, dont le rendement à l'hectare a ainsi pu être augmenté.

MUTATIONS CHROMOSOMIQUES

Nous savons que les chromosomes, pour des raisons encore peu élucidées, sont capables de se rompre. Cet accident peut se produire sous l'action de diffé-

rents agents, par exemple les radiations ionisantes. Ces cassures peuvent conduire à diverses structures dont les délétions qui correspondent à une perte de fragment de chromosome, les translocations et les inversions correspondant au transport d'un fragment de chromosome ou à son retournement et qui peuvent modifier la nature de l'information génétique et produire des mutations typiques. Nous avons vu, précédemment, que Sears a utilisé la translocation pour introduire dans une variété de blé tendre un gène de résistance à la rouille brune à partir d'un croisement avec *Aegilops*.

MUTATIONS FACTORIELLES

Ce sont surtout ces mutations, obtenues par radiations ou à l'aide de divers corps chimiques, qui ont fait l'objet des efforts des sélectionneurs. Leur technique d'emploi a été étudiée de longue date, en particulier à l'institut d'amélioration des plantes de Svalöf par Gustafson qui a réussi, sur Orge, à obtenir à peu près tous les mutants qu'il est possible de trouver dans la nature chez cette espèce. De nombreux autres chercheurs ont obtenu sur d'autres espèces des résultats analogues dont certains sont positifs du point de vue de l'agronome : création de lignées plus courtes, plus résistantes à la verse, transformation de types hiver en types alternatifs, obtention de lignées résistantes à certaines maladies.

**

Que pouvons-nous conclure de tous ces faits ?

Ce rapide survol montre que la génétique a apporté avant tout une meilleure compréhension des phénomènes et de certaines techniques utilisées de tout temps par le sélectionneur. Elle a permis aussi de s'abstenir de certaines pratiques qui, manifestement, ne pouvaient apporter aucun progrès et d'en mettre au point

de nouvelles, plus efficaces, surtout en ce qui concerne l'amélioration des plantes allogames. Mais ces méthodes ne permettent pas encore de transformer la structure même des plantes à volonté. On peut cependant en imaginer d'autres, beaucoup plus révolutionnaires et qui pourraient apporter des progrès encore plus décisifs. Elles nécessitent une connaissance beaucoup plus intime des phénomènes physiologiques et des diverses régulations qui déterminent la croissance, le développement, le rendement

et les résistances aux accidents et aux maladies. Elles débouchent sur des recherches de génétique physiologique et pourraient faire appel aux acquisitions nouvelles de la biologie moléculaire. Ces travaux ne sont évidemment pas à la portée des seuls sélectionneurs mais exigent une collaboration très étroite des biochimistes, des pathologistes, des physiologistes et des généticiens. Souhaitons que l'avenir nous permette d'assister à l'éclosion de ces recherches nouvelles.

III

Interventions

M. Désiré LEROUX. — Vous avez évoqué l'emploi de la colchicine. Ne croyez-vous pas que l'utilisation, dans un autre but, de substances comme les auxines, les gibbérellines, les dérivés de la choline, soit aussi susceptible de modifier, dans un avenir plus ou moins lointain, ces méthodes traditionnelles de la génétique que vous venez d'exposer ?

M. MAYER. — Vous me demandez si je vois des applications de la gibbérelline ? Voici un exemple :

Lorsqu'on cultive des concombres sous serre, on cherche à avoir des concombres sans graines, parce que la présence de graines déforme le concombre. Il est extrêmement difficile d'avoir des concombres sans graines avec la présence de fleurs mâles et de fleurs femelles et on est donc obligé d'enlever les fleurs

mâles pour éviter que l'introduction d'une abeille n'amène la perte de toute une serre.

On peut encore, par sélection, rechercher des plantes n'ayant que des fleurs femelles ; ces plantes ne peuvent évidemment pas se reproduire puisqu'il n'y a pas de pollen.

En utilisant la gibbérelline, on peut alors faire apparaître des fleurs mâles sur ces plantes, procéder aux croisements nécessaires et obtenir des graines. Celles-ci, cultivées à température convenable, donneront uniquement des plantes à fleurs femelles et, par conséquent, par parthénocarpie, une production de concombres sans graines.

Il y a d'autres exemples de l'utilisation de la gibbérelline.

M. Désiré LEROUX. — On a parlé récemment, m'excusant d'employer un langage familier et peu nuancé, de « blé sans paille » obtenu avec le C.C.C. Revenant à ma première question : ce chlorure de chloro-choline intervient-il au point de vue génétique ?

M. MAYER. — L'utilisation du C.C.C. ne peut produire du blé sans paille, mais il raccourcit la paille parce qu'il freine la croissance de l'entre-nœud s'allongeant au moment de son application et on peut arriver ainsi à avoir des blés plus courts. Mais cette utilisation pose plutôt des problèmes physiologiques que des problèmes de génétique.

M. VAYSSIÈRE, Président de séance. — Avez-vous l'impression que ces dernières

années on ait obtenu des résultats, ou entrepris des recherches, pour augmenter la résistance de certaines variétés vis-à-vis des insectes ? Vis-à-vis des champignons, je sais qu'on est arrivé à beaucoup de bons résultats, mais pour les insectes, il me semble que nous sommes en retard.

M. MAYER. — Pour les insectes, il y a actuellement assez peu d'exemples d'une sélection vraiment valable. On peut trouver des clones de pommes de terre sur lesquels le doryphore ne se reproduit que difficilement ; il existe des lignées de féverole qui sont moins attaquées par les pucerons ; mais enfin la lutte génétique contre les attaques des insectes est encore à ses débuts et certainement plus compliquée que la lutte contre les maladies dues à des cryptogames.

Evolution et progrès des Pompes

Leur adaptation aux applications récentes ()*

par M. PAUL BERGERON,
Président-Directeur Général
de la Maison L. Bergeron

Lorsque notre très regretté ami, M. Chapouthier, m'a pressenti quelques semaines avant sa fin tragique pour faire une conférence sur les récents progrès en matière de pompe, j'ai tout d'abord réservé ma réponse. Il s'agit, en effet, d'un sujet très vaste qui doit s'adresser ici, dans le cadre de cette conférence, à la fois à des spécialistes et à des non-spécialistes, c'est-à-dire qu'il risque de n'intéresser personne. Je me suis toutefois décidé à tenter cette expérience en souvenir de M. Chapouthier dont j'évoque aujourd'hui la présence parmi nous.

Pour limiter le sujet, il ne sera considéré, dans ce qui suit, que les pompes centrifuges, hélico-centrifuges et hélices, c'est-à-dire celles faisant partie des turbo-machines à l'exclusion de toutes autres machines élévatoires. Ces dernières, dont la technique est entièrement différente de celle des turbo-machines, mériteraient de faire l'objet d'un exposé spécial étant donné le développement considérable des applications des transmissions hydrauliques.

Bien que les pompes centrifuges, comme toutes les turbo-machines, aient connu, grâce à l'électricité, un essor considérable dès le début du siècle, elles n'ont cessé d'évoluer techniquement et on peut dire que ce n'est que ces dernières années que les pompes ont atteint le degré de perfectionnement technique auquel les moteurs électriques étaient arrivés précédemment.

Il faut en déduire non pas que les hydrauliciens sont en retard sur les électriciens, mais que les liquides sont plus difficiles à maîtriser que l'électricité, tout au moins dans le domaine des pompes et des machines.

Sur le plan des applications industrielles, il faut noter que tout produit, tout mélange qui présente dans son ensemble un aspect liquide plus ou moins fluide, visqueux ou pâteux et quelle que soit sa température est ou sera manutentionné par pompage. Indépendamment même de l'augmentation des puissances mises en

(*) Conférence faite le 20 octobre 1966, à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

jeu, de l'adaptation aux nouvelles conditions mécaniques imposées par l'évolution de la technique hydraulique, il a donc fallu aussi adapter la construction des pompes aux différents problèmes rencontrés au fur et à mesure de l'apparition des applications nouvelles et nul ne sait quels problèmes à résoudre réserve l'avenir.

Il y a donc lieu de considérer :

- *tout d'abord l'évolution de la technique hydraulique qui a une répercussion importante sur la construction des pompes,*
- *ensuite l'adaptation des pompes aux conditions et utilisations spéciales actuelles.*

I

L'évolution de la technique hydraulique des pompes

Il s'agit d'expliquer l'évolution technique sans faire de théorie.

Dans ces conditions la méthode la plus directe pour expliquer l'évolution de la technique est de montrer comment ont évolué les coefficients caractéristiques de base, ce qui mettra en évidence les facteurs sur lesquels il a fallu agir.

Ces coefficients de base doivent être exprimés uniquement en fonction des paramètres hauteur, débit et vitesse de rotation, afin qu'ils constituent des expressions mises à la disposition aussi bien de l'utilisateur que du constructeur, les dimensions de la machine n'intervenant pas.

Nous nous permettrons donc de les rappeler afin de pouvoir employer un langage commun entre spécialistes et non spécialistes.

Ce sont :

— *la vitesse spécifique n_s*

$$n_s = \frac{n Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (1)$$

avec :

n vitesse de rotation en tr/mn
 Q débit en m³/s
 H hauteur manométrique totale en m.

Les lois de la similitude mettent en évidence que ce nombre est le même pour tous les fonctionnements homologues de toutes les machines semblables. Il est variable tout le long de la courbe caractéristique d'une pompe déterminée, mais pratiquement on désigne cette pompe par son n_s au point de rendement maximal. Des pompes de même n_s ne sont pas obligatoirement semblables : cependant en ce qui concerne les pompes de construction courante pour lesquelles on recherche l'optimisation entre allure de caractéristique, prix, rendement et capacité d'aspiration, à chaque vitesse spécifique correspondent des rapports de proportion, comme par exemple celui du diamètre de sortie de la roue au diamètre d'entrée, très peu variables, même d'un constructeur à l'autre.

— *la charge nette absolue d'aspiration* exprimée en mètres de liquide pompé et désignée de plus en plus par la notation américaine NPSH, mais que, pour la facilité de l'écriture nous continuerons à désigner par H_{na} .

$$H_{na} = \frac{h_{b0} - h_{v0}}{d} - H_a \quad (2)$$

avec :

h_{b0} valeur de la pression régnant sur

le plan du liquide à l'aspiration, exprimée en m d'eau froide ;

h_{v_0} la pression de vapeur de liquide pompé, toujours exprimée en m d'eau froide ;

d la densité par rapport à l'eau froide du liquide pompé ;

H_a est la différence de niveau h_a entre l'axe de la roue et le plan d'eau à l'aspiration (prise positivement lorsque l'axe est au-dessus de ce plan d'eau), augmentée des pertes de charge dans la tuyauterie d'aspiration qui interviennent comme une hauteur d'aspiration supplémentaire.

Cette expression représente la pression absolue disponible avant l'entrée dans la roue.

C'est sur cette pression absolue que seront prélevées d'une part l'énergie cinétique $\frac{V_A^2}{2g}$ à l'entrée A de la roue et, d'autre part, la différence de pression Δh existant entre l'entrée de la roue et une zone B, à l'intérieur de la roue, où la pression est obligatoirement inférieure à la pression à l'entrée en A.

Évaluée en pression absolue au-dessus de la pression de vapeur elle est égale à :

$$H_{na} - \frac{V_A^2}{2g} - \Delta h$$

Si on diminue H_{na} en augmentant H_a jusqu'au moment où l'expression ci-dessus égale zéro, c'est dire que la pression en B est égale à la pression de vapeur h_v . En diminuant encore H_{na} , le liquide se met à bouillir. *C'est la cavitation.*

On voit immédiatement que l'une des préoccupations primordiales du constructeur sera de réduire la valeur de $\frac{V_A^2}{2g} + \Delta h$ par des tracés sans cesse améliorés.

Pour une machine donnée, la valeur de H_{na} critique à prendre en considération,

en chaque point de son fonctionnement, est celle pour laquelle la machine commence à caviter.

Malheureusement le phénomène est loin d'être aussi simple que décrit. En effet, la cavitation est soumise à un certain nombre de facteurs qui font qu'il existe, entre l'absence de toute cavitation et la cavitation nettement caractérisée, une période transitoire où le phénomène et ses conséquences sont encore mal définis.

La difficulté sur laquelle on se penche aujourd'hui, et qui fait le sujet des nombreux congrès des spécialistes, est de définir ce que l'on appelle « début de cavitation », ou même simplement « cavitation acceptable », d'où une certaine imprécision dans la définition rigoureuse du H_{na} critique.

Sous certaines réserves, non négligeables d'ailleurs, mais dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici, H_{na} , exprimé en m de liquide, suit les lois de la similitude, c'est-à-dire que pour tous les fonctionnements homologues de toutes les machines semblables H_{na} variera comme H.

— Le coefficient de cavitation de Thoma.

$$\sigma_c = \frac{H_{na}}{H} \quad (3)$$

D'après la remarque précédente H_{na} variant comme H pour tous les fonctionnements homologues de toutes les machines semblables σ_c est un invariant. A noter toutefois que, comme n_s , il varie tout le long de la caractéristique d'une même pompe.

En écrivant :

$$n_s = \frac{nQ^{1/2}}{(H_{na})^{3/4}} \left(\frac{H_{na}}{H} \right)^{3/4} = S \sigma_c^{3/4} \quad (4)$$

on fait apparaître un nouveau coefficient S appelé *vitesse spécifique d'aspiration*. Ce coefficient varie avec la vitesse spécifique n_s ; mais pour des raisons, dont il serait trop long ici d'exposer les cau-

ses, le coefficient S varie très peu avec n_s (approximativement de 180 à 200 pour fixer les idées), lorsqu'on considère les pompes de construction normale pour lesquelles on recherche l'optimalisation entre rendement, prix et allures de caractéristiques à l'exclusion de toute autre considération.

En effet, pour des cas particuliers comme par exemple celui des pompes d'extraction, pour lesquelles la qualité primordiale est d'avoir une grande capacité d'aspiration, on peut réaliser des tracés donnant des valeurs de S beaucoup plus élevées quitte à sacrifier le rendement et le prix.

Autrement dit, on arrive pour les pompes normales à cette constatation pratique remarquable que, quel que soit le type de machine et sa vitesse spécifique, si on les ramène toutes à des machines semblables faisant toutes le même débit à la même vitesse de rotation, la valeur de H_{na} sera sensiblement la même.

Ces définitions nous permettent désormais d'utiliser le « jargon » des spécialistes et de passer à l'examen des différents aspects de l'évolution de la technique hydraulique des pompes tout en précisant les facteurs à prendre en considération.

a) AUGMENTATION DES VITESSES DE ROTATION ET DES HAUTEURS PAR ETAGE.

Que ce soit pour des raisons économiques, afin de réduire les prix, ou pour permettre des réalisations techniques impossibles autrement, une évolution capitale réside dans l'augmentation des vitesses de rotation pour une même valeur de Q et de H , c'est-à-dire une augmentation des vitesses spécifiques.

D'après (1), augmenter n , à Q et H constants, c'est augmenter n_s . Mais augmenter n_s en laissant σ constant (ce qui est primordial), c'est, d'après (4), augmenter S , c'est-à-dire diminuer H_{na} à vitesse et débit constants. C'est la raison pour laquelle l'attention des contruc-

teurs a été portée sur le choix de tracés diminuant le terme $(\frac{V_A^2}{2g} + \Delta h)$.

On voit également, toujours d'après (4), que si pour un n_s donné on a pu augmenter S , il en résulte que σ_s a diminué, c'est-à-dire que pour une certaine valeur de H_{na} on peut adopter des valeurs H plus grandes.

En conclusion l'amélioration des conditions d'aspiration caractérisées par S est à la base même de l'évolution des vitesses et hauteurs, la cavitation restant l'obsession de l'hydraulicien et étant encore aujourd'hui un des sujets principaux sur lequel se porte la recherche.

— Performances réalisées en grandes valeurs de H .

Cette amélioration étant acquise, il est en général intéressant d'essayer de réaliser, lorsque les hauteurs à faire par une installation sont élevées, la plus grande valeur de H par roue, afin d'éviter dans toute la limite du possible la pompe multicellulaire, ou d'en diminuer le nombre d'étages.

La hauteur maximale possible pour une roue déterminée est d'abord fonction de n_s . En effet, en considérant $n_s = \frac{n Q^{1/2}}{H^{3/4}}$ on voit que pour un débit et une vitesse donnés H variera comme $\frac{1}{(n_s)^{4/3}}$, d'où des hauteurs possibles d'autant plus grandes que n_s est plus petit. Pour un certain n_s , H possible décroît avec Q ; donc, pour un débit et un n_s donnés, le seul moyen d'augmenter H est d'augmenter la vitesse de rotation.

Parmi les réalisations intéressantes caractérisant ces remarques citons celles des pompes alimentaires des centrales thermiques. Ces pompes, fonctionnant d'ailleurs à des températures élevées (de l'ordre de 200 °C), doivent, pour des débits relativement faibles, réaliser de très grandes hauteurs. Ce sont de ce fait des pompes multicellulaires, mais dont il convient, pour des raisons mécaniques, de réduire au maximum le nombre d'éta-

ges, c'est-à-dire d'augmenter les hauteurs faites par étage.

Ces pompes sont donc de faible vitesse spécifique entraînée par des multiplicateurs de vitesses, ou par turbines à vapeur, afin de tourner à des vitesses supérieures à 3 000 tr/mn, vitesse maximale pour entraînement par moteur électrique avec courant alternatif à 50 Hertz.

Pour donner des chiffres citons les exemples suivants :

- pour un groupe de 250 MW :
 - débit : 232 l/s,
 - hauteur totale : 2 150 m avec 5 étages,
 - hauteur par étage : 430 m, $n_s = 28$ environ,
 - vitesse de rotation : $n = 5\,500$ tr/mn.
- Pour un groupe de 600 MW :
 - Débit : 590 l/s,
 - hauteur totale : 2 150 m, 5 étages,
 - hauteur par étage : 430 m, $n_s = 32,5$ environ.
 - $n = 4\,000$ tr/mn.

Ce sont-là des performances récentes mais qui seront certainement dépassées dans un avenir prochain.

Ceci étant dit, théoriquement il n'y a pas de limite à l'augmentation des hauteurs par roue, sous condition que l'on respecte l'expression :

$$n_s = S \left(\frac{H_{na}}{H} \right)^{3/4}$$

en laissant $\frac{H_{na}}{H}$ constant,

c'est-à-dire que l'on assure à l'aspiration une charge supérieure au H_{na} de la pompe et ceci proportionnellement à la valeur de H que l'on veut réaliser.

Mais il existe des limites pratiques qui sont en particulier conditionnées par le fait que les vitesses à l'intérieur de la machine croissent comme la racine carrée des hauteurs et que les pulsations de pression varient comme les hauteurs H .

- Si l'on tient compte, par exemple, que la vitesse périphérique d'une roue faisant 500 m de hauteur est environ de 100 m/s on comprendra la nécessité d'un équilibrage dynamique parfait qu'il est difficile d'atteindre sur des grosses pièces.
- L'importance des états de surface croît également avec les hauteurs, les moindres aspérités provoquant de petites perturbations locales. Il faut reconnaître une certaine méconnaissance des phénomènes de cavitation dans leurs subtilités. Hors de l'écoulement principal, il peut exister des micro-cavitations localisées, comme celles dues aux défauts de surface, qui s'intensifient avec les vitesses et qui, inoffensives pour des faibles hauteurs, provoquent des érosions quand celles-ci sont grandes.
- L'écoulement dans une pompe est toujours légèrement pulsatoire. Avec l'augmentation des hauteurs, ces pulsations peuvent provoquer des vibrations.
- Enfin, l'augmentation des pressions pose des problèmes de résistance mécanique dont les résolutions ont été beaucoup facilitées par les progrès de la métallurgie.
- Lorsqu'on augmente ainsi H en augmentant H_{na} il arrive fréquemment qu'il soit impossible de réaliser des installations capables de fournir cette valeur de H_{na} élevée à la pompe. Dans ce cas on prévoit une pompe nourricière, à l'aspiration de la pompe principale, qui fournit à celle-ci la charge qui lui est nécessaire. Par exemple les pompes alimentaires peuvent être précédées d'une pompe dite pré-alimentaire.

En conclusion tous les efforts ont tendu et tendent toujours à augmenter la hauteur faite par roue. A l'heure actuelle malgré les progrès considérables on est encore limité à des valeurs maximales, fonction d'ailleurs de n_s et aussi des dimensions de la machine, de la

durée d'utilisation, de la nature des liquides, etc...

Pour fixer les idées, nous donnerons les valeurs approximatives suivantes qui s'appliquent à des réalisations récentes :

- 550 m pour des pompes alimentaires en eau chaude construites en France ; près de 1 000 m par roue ou même davantage, paraît-il à l'étranger.
- 410 m par roue pour les pompes-turbines de Villarino en Espagne : Puissance : 125 000 kW ; $n_s = 35$ environ.

b) AMELIORATION DES RENDEMENTS

Si évidemment le choix de meilleures proportions et l'amélioration des réalisations mécaniques ont joué leur rôle dans l'augmentation des rendements, par contre, la raison principale des gains substantiels obtenus en rendement depuis 40 ans est due surtout à la meilleure récupération de l'énergie cinétique à la sortie de la roue. Ce qui peut paraître paradoxal c'est que, dès l'origine, mis à part des tracés vraiment extravagants, le rendement des roues a été bon, c'est-à-dire nettement supérieur à 90 %. Si bien que l'augmentation des rendements des roues n'a que peu participé à l'évolution spectaculaire des rendements des pompes. Insistons cependant sur le fait que le tracé des roues influe par contre considérablement sur les capacités d'aspiration.

L'énergie communiquée par la roue l'est sous deux formes : d'une part une différence de pression entre l'entrée et la sortie, d'autre part une différence d'énergie cinétique, la vitesse absolue à la sortie étant supérieure à la vitesse à l'entrée de la roue. Pour fixer les idées, cette différence d'énergie cinétique — variable d'ailleurs avec n_s — passe d'environ 30 % de l'énergie totale mise en jeu pour de faibles n_s , à environ 10 % pour les grandes vitesses spécifiques.

Cette énergie cinétique est à récupérer

en énergie de pression grâce à un ralentissement progressif dans la pièce qui suit la roue et qui joue le rôle de diffuseur.

Mais si un fluide ne demande qu'à accélérer, par contre le ralentissement se réalise toujours dans des conditions délicates car l'écoulement se fait vers les pressions croissantes, ce qui tend à provoquer des décollements lorsque ce ralentissement est trop accentué.

C'est pourquoi le diffuseur qui suit les roues a présenté des difficultés qui n'ont été franchies que progressivement.

Bien que dès 1910 Louis Bergeron ait mis en évidence que la simple volute ouverte en forme de colimaçon était un excellent diffuseur, très longtemps encore, sur les pompes à un étage, on a prévu des diffuseurs à ailettes précédant la volute, en particulier pour les pompes de moyen et faible n_s , pour lesquelles, comme déjà dit, les énergies cinétiques constituent une proportion importante de l'énergie totale. Ces diffuseurs à ailettes, en général bien polis, permettent un ralentissement plus rapide de l'eau avant qu'elle ne pénètre dans la volute.

Cette construction s'est justifiée d'ailleurs tant que les procédés de fonderie n'ont pas permis d'avoir des états de surface très satisfaisants. De ce fait, de grandes vitesses dans la volute conduisaient à de fortes pertes de charge qui compromettaient le rendement malgré une bonne diffusion théorique.

Les conditions de fabrication s'améliorant, on en est venu à adopter la simple volute, sans diffuseur à ailettes, même pour les faibles n_s et pour les grandes hauteurs, c'est-à-dire pour de très grandes vitesses d'écoulement.

Cette solution a même été adoptée par certains constructeurs américains pour les pompes multicellulaires, chaque volute étant reliée à l'aspiration de la roue suivante, par une tuyauterie extérieure. Cependant, d'une manière à peu près générale, toutes les pompes multicellulaires restent avec diffuseurs et canaux de

retour, avec aubes reliant la sortie d'une roue à l'entrée de la roue suivante.

Avec la construction sans diffuseur à ailettes, les rendements se sont avérés excellents, sous réserve d'un tracé parfaitement correct et de mise au point de certains détails de conception, comme la forme de la languette, les espaces libres,

etc... qui prennent une grande importance, étant donné les grandes vitesses d'écoulement.

Autres avantages : les vitesses dans la volute étant plus grandes, les sections sont plus réduites, donc les poids plus faibles et la résistance mécanique meilleure (voir figure 1 *b* comparée à 1 *a*).

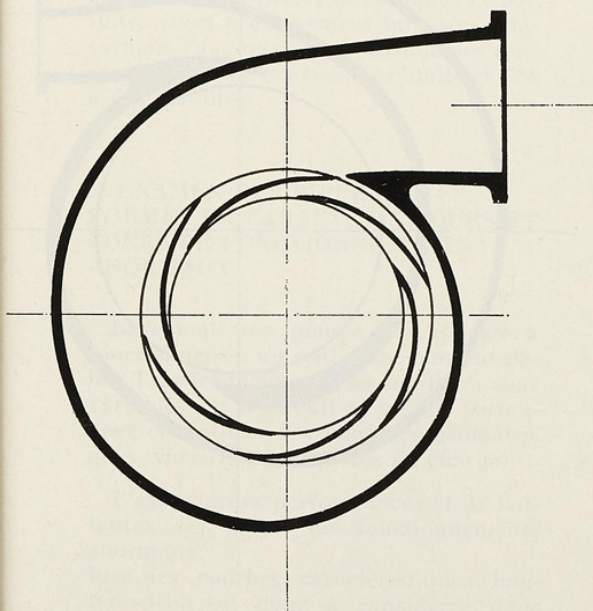


FIG. 1 *a*. — Volute avec diffuseur

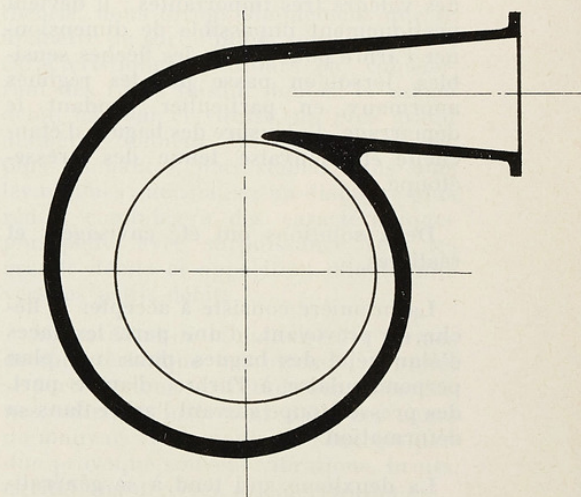


FIG. 1 *b*. — Volute ouverte

$$n_s = 27 \quad H = 100 \text{ m}$$

« Pour toutes ces raisons, qui sont favorables, on peut considérer que la suppression, dans toute la limite du possible, des diffuseurs à ailettes au bénéfice des simples volutes, constitue une *évolution très spectaculaire de la technique des pompes*. »

Un inconvénient de la volute simple est cependant apparu lorsqu'on augmente les hauteurs.

En dehors de la zone de fonctionnement du rendement maximal, pour lequel la pompe a été calculée, les pressions autour de la roue cessent d'être uniformes. Les pressions radiales ont alors une composante, proportionnelle à la hauteur faite, qui agit comme une charge transversale sur l'arbre. Pour de grandes hauteurs, ces efforts atteignent des valeurs très importantes ; il devient pratiquement impossible de dimensionner l'arbre pour éviter des flèches sensibles, lorsqu'on passe par les régimes anormaux, en particulier pendant le démarrage, d'où usure des bagues d'étanchéité et mauvaise tenue des presse-étoupe.

Deux solutions ont été envisagées et réalisées.

La première consiste à accepter la flèche en prévoyant, d'une part, les faces d'étanchéité des bagues dans un plan perpendiculaire à l'arbre, d'autre part, des presse-étoupe suivant l'arbre dans sa déformation.

La deuxième, qui tend à se généraliser, est la double volute (voir figure 1 c). Les deux volutes sont décalées de 180° (c'est en fait un diffuseur à 2 aubes). Les déséquilibres de pression sont alors opposés, leur résultante est nulle.

Autre remarque : lorsque les hauteurs faites par la machine et les dimensions de cette machine deviennent importantes, une volute ouverte supporte, de par sa forme, des fatigues et des déformations telles que le dimensionnement en devient inacceptable. Dans ce cas, qui se

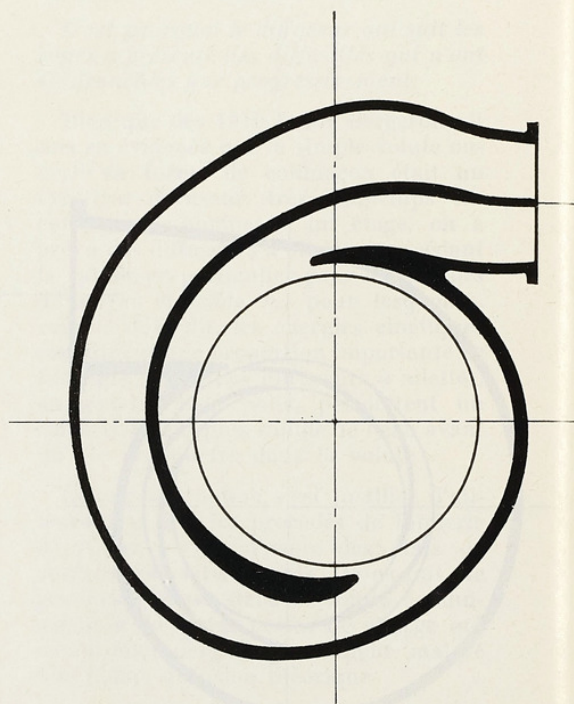


FIG. 1 c. — Double volute
 $n_s = 27$ $H = 100$ m

présente surtout pour les machines de grandes puissances, on prévoit à nouveau à l'entrée dans la volute des aubes venant de fonderie avec celle-ci pour la simple raison que ces aubes constituent des *entretoises* qui limitent considérablement les fatigues du matériel. Souvent même on évite qu'elles ne provoquent un ralentissement de l'eau trop important, afin de réduire les sections de la volute qui varient en fonction inverse des vitesses.

En conclusion, diminution des pertes dans la roue, amélioration de la récupération de l'énergie cinétique à la sortie, amélioration des formes et des proportions, font que les pertes hydrauliques proprement dites sont réduites à quelque pour cent. Les pertes mécaniques et par fuites étant pratiquement imposées, désormais l'augmentation possible des rendements est excessivement réduite et liée à des subtilités.

c) EXAMEN DES DIFFERENTES FORMES DE CARACTERISTIQUES ET ZONES DE FONCTIONNEMENTS ANORMAUX.

Rarement une pompe est appelée à fonctionner en un seul point hauteur-débit. Très fréquemment les hauteurs sont variables sur le circuit en régime permanent (variations des hauteurs géométriques, variations des pertes de charge).

L'examen des performances et de l'altitudes des zones de fonctionnements anormaux.

lure des courbes caractéristiques hauteur-débit est donc à considérer dans

Or, l'allure des caractéristiques est liée aux proportions de la roue.

Si pour réaliser un certain débit à une certaine hauteur et vitesse, le diamètre à l'entrée d'une roue est conditionné par les questions de capacité d'aspiration de la machine, par contre le choix du diamètre à la sortie présente certaines latitudes.

Par contre réduire le diamètre de la roue conduit à des pompes plus légères, moins encombrantes et moins coûteuses ; de plus les pertes sont plus faibles, donc le rendement est meilleur.

Pour les réalisations importantes, qui impliquent des pompes étudiées spécialement pour un cas particulier, on conçoit qu'il y a un choix subtil à faire pour déterminer les dimensions permettant d'obtenir dans les meilleures conditions les caractéristiques les mieux adaptées au cas considéré. Ces dimensions ne seront pas les mêmes si le fonctionnement doit avoir lieu en un seul point de la courbe caractéristique hauteur-débit, ou bien sur toute une plage de celle-ci, ou même encore jusque dans les zones de mauvais rendement.

En nous refusant de faire ici de la théorie, nous dirons simplement que le diamètre de sortie influe sur l'allure des caractéristiques. Toujours en considérant des roues faisant toutes le même débit, hauteur et vitesse, un plus grand diamètre donnera des caractéristiques plus tombantes, plus stables dans tous les régimes anormaux ; un diamètre plus réduit conduira à des caractéristiques plus plates avec surpuissance vers les grands débits et apparition d'instabilité vers les petits débits.

Aujourd'hui où la maîtrise des formes de caractéristique est atteinte, l'intérêt se porte surtout sur l'étude des phénomènes, existant justement dans ces zones de mauvais rendement, où l'énergie perdue provoque souvent vibrations, bruits, cavitations diverses et détériorations.

De plus, soit au cours du démarrage, soit, surtout, au cours de la disjonction d'un groupe de pompage, pendant la période transitoire où l'eau dans la conduite s'arrête et tend à revenir ou revient en arrière dans le sens gravitaire, la pompe peut fonctionner sous hauteur, débit ou vitesse négatifs. Tous les fonctionnements ainsi obtenus en combinant entre elles toutes les valeurs positives et négatives des hauteur, débit et vitesse ont fait et font l'objet d'études impor-

tantes permettant la connaissance des allures des caractéristiques dans tous les fonctionnements possibles.

C'est ici qu'il y a lieu de signaler le fait suivant : lorsque la hauteur restant positive, débit et vitesse sont inversés, on se trouve dans le cas d'une bonne turbine centripète pour laquelle tous les angles et écoulements sont corrects. Le principal reproche qu'on puisse faire est qu'elle n'a pas alors les dimensions conduisant au rendement optimal de la marche en turbine et que la volute est plus ou moins bien adaptée.

Cette remarque explique le grand développement qu'est en train de prendre ce nouveau type de machine appelée *pompe-turbine réversible* qui fonctionne en pompe en tournant dans un sens et en

turbine en tournant en sens inverse, machine qui trouve son application dans les stations d'accumulation. On sait que ces usines, qui fonctionnent entre deux retenues, relèvent un certain volume d'eau pendant les heures creuses où le kWh est bon marché, pour le turbiner aux heures de pointes en restituant des kWh de valeur élevée. Les deux fonctionnements sont réalisés par la même machine que l'on parvient à dimensionner pour avoir un bon rendement tant en pompe qu'en turbine, au prix d'une part de quelques concessions réciproques dans le dimensionnement des roues et, d'autre part, par une adaptation, au fonctionnement en pompe, des directrices mobiles qui, indispensables dans la marche en turbine, jouent le rôle de diffuseur dans la marche en pompe.

II

Adaptation des pompes aux conditions et aux utilisations spéciales actuelles

Il a fallu adapter les pompes, d'une part à l'augmentation sans cesse croissante des débits et puissances, d'autre part aux multiples domaines d'application qui s'étendent continuellement.

Considérons successivement ces deux aspects.

a) AUGMENTATION DES DEBITS ET PUISSANCES.

Dans tous les domaines les puissances vont en croissant que ce soit pour l'alimentation des agglomérations en eau, pour les Centrales thermiques qui exigent des débits d'eau fonction de la puissance des groupes qui sont passés en 20 ans de 50 MW à 600 MW, pour les Irrigations, les Services publics et enfin pour les stations d'accumulation qui ont conduit aux performances les plus éle-

vées analogues à celles des turbines hydrauliques.

Pour illustrer cette évolution, citons quelques exemples dans ces domaines particuliers.

— Alimentation en eau des agglomérations urbaines.

Avant la dernière guerre des groupes de l'ordre de 30 000 m³/jour étaient parmi les plus puissants.

Ces quinze dernières années la Compagnie générale des eaux équipait successivement ses usines de Choisy, Méry et Neuilly-sur-Marne de 13 groupes de 100 à 120 000 m³/jour. Le dernier groupe en exécution comporte une pompe de 400 à 500 000 m³/jour. La figure 2 en montre

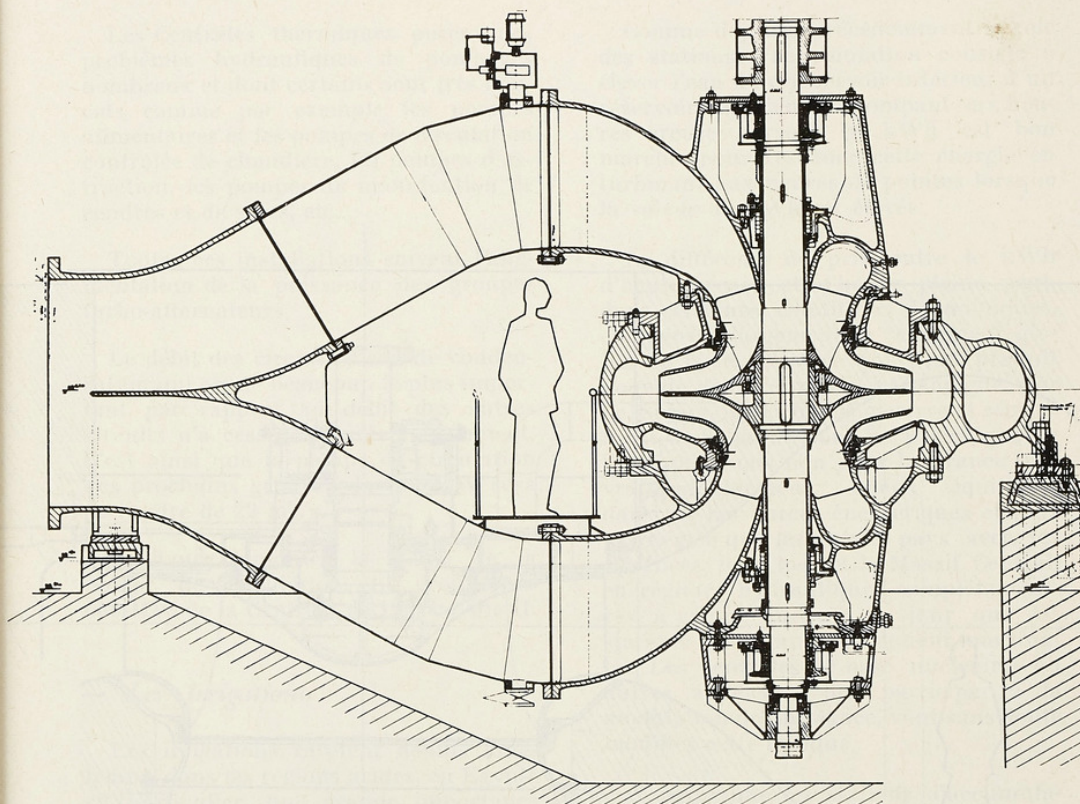


FIG. 2. — Pompe élévatoire d'eau potable
 $Q = 400\,000 \text{ à } 500\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ ($4,6 \text{ à } 5,85 \text{ m}^3/\text{s}$) $H = 95 \text{ m}$

(cliché Bergeron)

la coupe longitudinale. Cette pompe, qui fait une hauteur moyenne de 95 m, a une vitesse spécifique de 32. Elle est à double volute.

Elle est actuellement en France la plus puissante en tant que pompe d'alimentation en eau d'une agglomération urbaine. Elle constitue, en effet, une unité capable d'approvisionner à elle seule plus de un million d'habitants, même pendant les mois les plus chargés.

De tels groupes seront malgré tout certainement dépassés dans l'avenir pour résoudre des problèmes plus vastes, comme par exemple celui de l'alimentation en eau de la Californie. L'eau doit être prélevée dans la « Feather River » à environ 600 km au Nord. La principale station de relèvement de l'aqueduc d'amenée, celle de Tehachapi, est prévue pour 16 groupes de pompes de près de $9 \text{ m}^3/\text{s}$ chacun refoulant à 600 m environ, soit près de 60 000 kW par groupe.

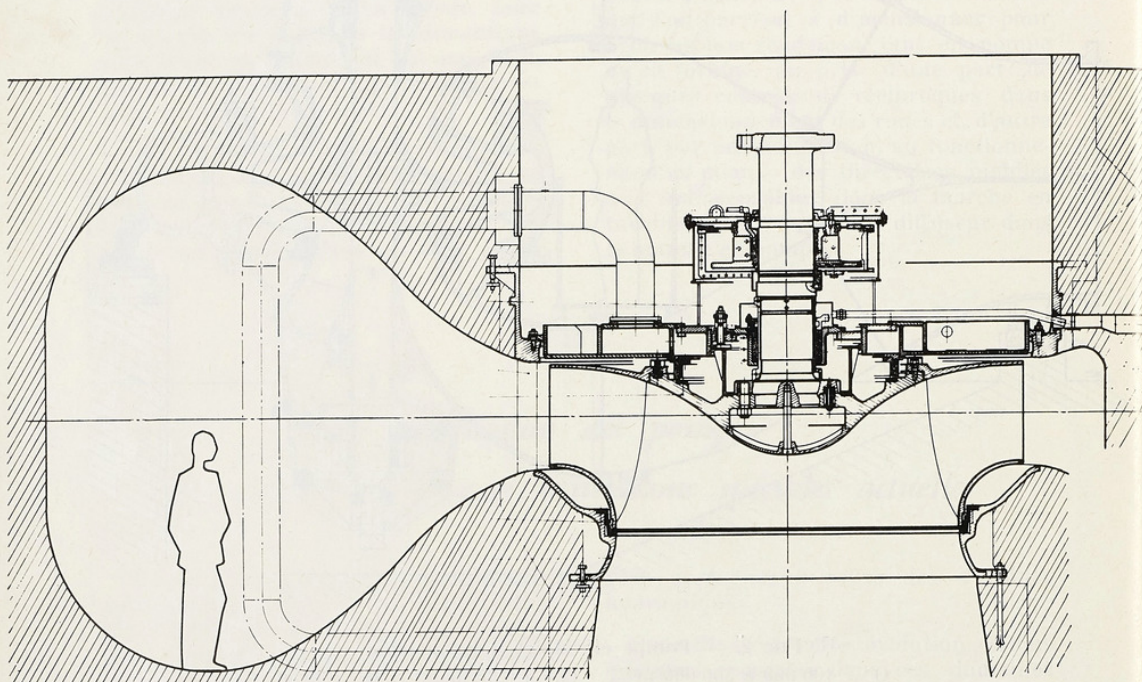


FIG. 3. — Pompe de circulation de condenseur
 $Q = 22\,000\text{ l/s}$ $H = 6\text{ m}$

(cliché Bergeron)

— Les Centrales thermiques.

Les Centrales thermiques posent des problèmes hydrauliques de pompages nombreux et dont certains sont très délicats comme par exemple les pompes alimentaires et les pompes de circulation contrôlée de chaudière, les pompes d'extraction, les pompes de manutention de cendres et de suies, etc...

Toutes ces installations suivent l'augmentation de la puissance des groupes turbo-alternateurs.

Le débit des circuits d'eau de condensation qui est de beaucoup le plus important par rapport au débit des autres circuits n'a cessé de croître également. C'est ainsi que la pompe de circulation des prochains groupes de 600 MW sera de l'ordre de 22 m³/s.

La figure 3 montre la coupe de la pompe de circulation du groupe de 600 MW de la Centrale de Porcheville II.

— Les irrigations.

Les irrigations revêtent depuis longtemps, dans les régions arides, en Egypte en particulier, une grande importance parce que traitées pour de grandes étendues. Les débits des pompes y sont souvent importants (3 à 10 m³/s) et les hauteurs faibles (quelques mètres), car il s'agit d'irrigation par canaux.

L'irrigation par aspersion, qui prend un grand développement, a apporté un changement dans l'aspect du problème. De ce fait des réalisations importantes en France, où jusque-là ce domaine était resté très artisanal, se sont développées ces dernières années, dont en particulier celles de l'équipement de la Compagnie nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc. Il s'agit de l'aménagement de toute la région comprise entre le Rhône et l'Aude, le débit total prélevé au Rhône doit atteindre 75 m³/s.

— Pompes d'accumulation.

Comme déjà dit précédemment le rôle des stations d'accumulation consiste à élever l'eau d'un réservoir inférieur à un réservoir supérieur en pompant aux heures creuses lorsque le kWh est bon marché, pour restituer cette énergie en turbinant aux heures de pointes lorsque la valeur du kWh est élevée.

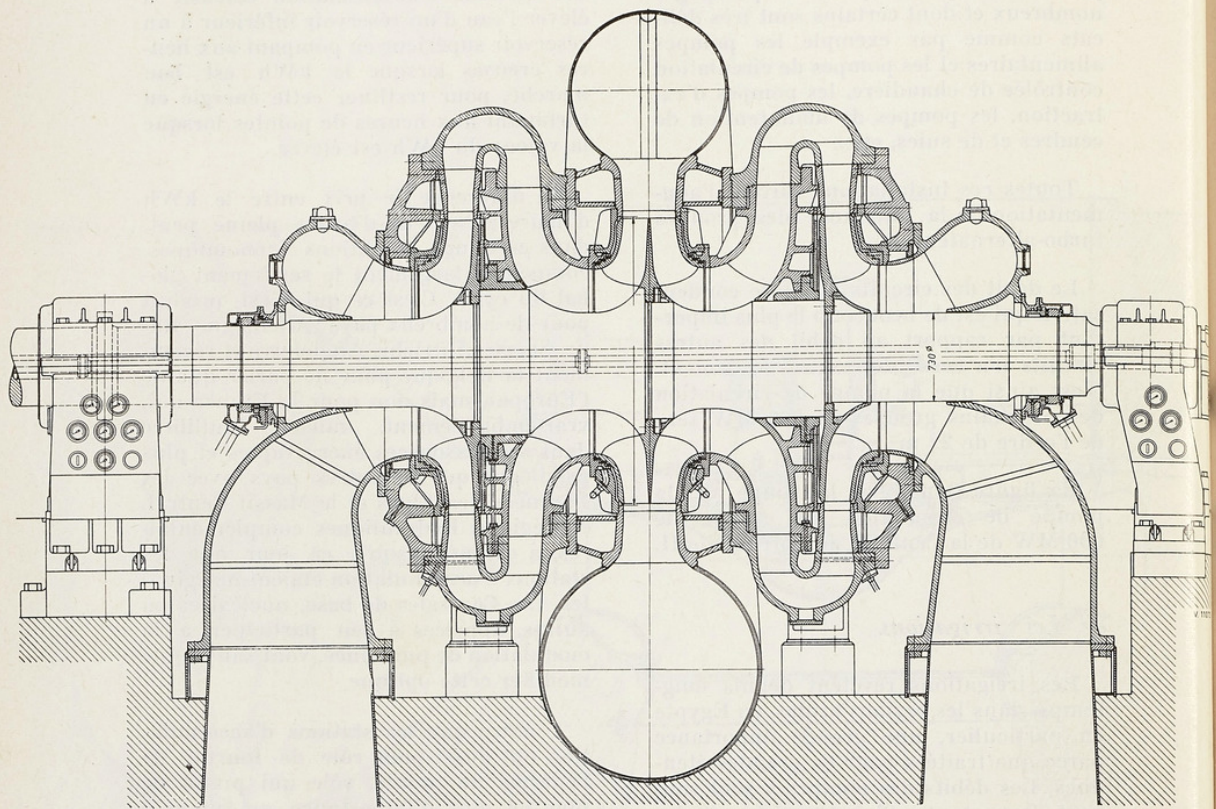
La différence de prix entre le kWh d'heure creuse et d'heure pleine peut, dans certaines conditions économiques, compenser largement le rendement global du cycle. C'est ce qui s'est produit pour de nombreux pays (Allemagne, Italie, Suisse, Autriche, Angleterre et récemment la Belgique pour ne parler que de l'Europe), mais non pour la France qui, vraisemblablement, mieux équilibrée dans ses ressources énergétiques et plus privilégiée que les autres pays avec les Pyrénées, les Alpes et le Massif Central, en régimes hydrauliques complémentaires, a estimé jusqu'à ce jour que les stations d'accumulation étaient marginales. Les Centrales de base, nucléaires ou autres, appelées à peu participer à la modulation de puissance, vont sans doute modifier cette optique.

A noter que les stations d'accumulation ont aussi pour rôle de fournir de l'énergie de pointe, rôle qui prend de plus en plus d'importance, au fur et à mesure du développement de la consommation d'énergie.

De toute manière ces stations ont conduit pour les pompes aux réalisations les plus puissantes et les plus spectaculaires.

Jusqu'à ces dernières années les stations d'accumulation étaient constituées de groupes dits ternaïres. Ces groupes comprennent, accouplés sur la même ligne d'arbre une turbine, une pompe et un alternateur-moteur.

Pour fixer les idées, citons quelques exemples :



$H = 280 \text{ m. env.}$ $n = 428,6 \text{ tr/mn}$ $P = 70.000 \text{ Kw. env.}$

FIG. 4. — Pompe d'accumulation (usine de Vianden)

(cliché Voith Heidenheim)

— La centrale de Vianden, dont le but est de régulariser en particulier la puissance des centrales à lignite du Bassin Rhénan, est équipée de pompes de 69 000 kW ($23 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 290 m).

Ces pompes sont à deux étages, deux entrées (figure 4). Elles sont lancées vides d'eau par une turbine Pelton auxiliaire. Lorsque la vitesse de synchronisme est atteinte, la pompe est accouplée par clabotage à l'alternateur puis remplie. L'alternateur ne s'arrête donc pas lorsqu'on passe du fonctionnement en pompe au fonctionnement en turbine. Ce passage est donc très rapide et permet de régulariser la puissance à tout instant de la journée.

— La centrale de Saückingén équipée de pompes de $16,15 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 408 m avec une puissance de 70 600 kW. Ces pompes sont à deux roues en opposition ce qui permet l'équilibrage naturel des poussées axiales.

Des aubes, venues de fonderie avec les couronnes d'acier moulé à l'entrée des volutes, servent d'entretoises et sont là pour limiter les fatigues.

Dans cet exemple, la pompe est accouplée progressivement au moteur par l'intermédiaire d'un convertisseur de couple avant le clabotage final.

— La centrale de Lunersee équipée de pompes débitant $4\,200 \text{ l/s}$ sous 960 m (un des records de hauteur en pompe d'accumulation), soit une puissance de 42 000 kW. Ces pompes sont verticales, multicellulaires à cinq étages et peuvent être déplacées sur des rails.

Comme dit précédemment, la tendance ces dernières années est de substituer aux groupes ternaires des groupes binaires composés d'une seule machine hydraulique : une pompe-turbine réversible, dont le sens de rotation s'inverse en passant de la marche en pompe à la marche en turbine et vice-versa.

Cette tendance actuellement s'accroît très rapidement.

La turbine-pompe est accouplée à une seule machine électrique fonctionnant en moteur et en alternateur. D'un prix et d'encombrement beaucoup plus réduits, ces groupes ont l'inconvénient d'être obligés d'inverser leur sens de rotation pour passer d'un fonctionnement à l'autre, ce qui nécessite un temps plus long pour changer de régime. Ce n'est d'ailleurs un inconvénient que lorsque la puissance doit être modulée à tout instant de la journée.

Jusqu'à présent les pompes-turbines réversibles sont à une seule roue. Les records déjà atteints sont les suivants :

- record de hauteur, 370 m à Cruachan (G.-B.) ;
- record de puissance, 210 000 kW à Taum-Sauk (U.S.A.) ;
- record de débit, $138 \text{ m}^3/\text{s}$, à Valdecana sur le Tage inférieur, le même aménagement comportant également à Torrejon des pompes-turbines réversibles d'un débit de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ en pompe.

b) ADAPTATION DE LA CONSTRUCTION DES POMPES A LA NATURE PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES PRODUITS POMPES.

Tout produit qui peut couler étant destiné à être pompé pour assurer sa manutention, la diversité des utilisations est considérable. Les cas rencontrés présentent chacun des caractéristiques différentes de :

- température, toxicité, corrosivité, abrasivité, viscosité, tension de vapeur, etc...

Devant cette diversité une classification logique est pratiquement impossible.

Mais avant d'examiner quelques exemples particuliers on peut dégager deux remarques d'ordre général :

— La première est qu'un grand nombre d'applications nécessitent des matières et métaux spéciaux. Les progrès de la métallurgie, en particulier des aciers

et des bronzes spéciaux, les progrès dans le domaine des matières plastiques, et autres, ont permis des réalisations qui sans eux auraient été compromises, sinon rendues impossibles.

— La deuxième est que, dans un très grand nombre de cas la question des garnitures d'étanchéité, à la sortie de l'arbre, prend une importance capitale. Suivant les cas on peut soit tolérer quelques fuites, mais en prenant des précautions particulières, soit interdire toute fuite lorsqu'il s'agit de liquides risquant de contaminer l'atmosphère, ou d'être contaminés par lui, ou encore de produits corrosifs inflammables, etc...

La figure 5 illustre deux types de garnitures, l'une à tresses, l'autre dite garniture mécanique. La première est admissible lorsqu'on tolère une légère fuite et lorsque la vitesse périphérique de l'arbre le permet ; l'autre est prévue pour supprimer pratiquement toute fuite. De plus, la figure représente une application dans le cas d'un pompage d'eau chaude à haute température.

La garniture à tresses présente l'aspect habituel, mais comme il faut empêcher que la fuite ne se vaporise en passant à la pression atmosphérique, le presse-étoupe est précédé d'un écran thermique avec circulation d'eau froide. Le débit de fuite est ainsi progressivement refroidi. Une nouvelle circulation d'eau froide dans le fouloir du presse-étoupe condense la vapeur qui pourrait encore se dégager.

Il y a lieu de s'arrêter plus longuement sur la garniture mécanique. L'étanchéité est assurée dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, par deux surfaces rigoureusement polies portées par des bagues, l'une solidaire de l'arbre, l'autre fixe. Ces surfaces glissent l'une sur l'autre avec, en principe, entre elles une fine pellicule de liquide intercalaire qui évite le grippage.

Etant donné la précision rigoureuse avec laquelle ces deux surfaces doivent se présenter l'une par rapport à l'autre, toute vibration, déplacement ou flèche

de l'arbre compromettrait le fonctionnement, si la bague fixe et la bague mobile n'étaient montées flottantes sur des joints élastiques en matière synthétique choisie en fonction du liquide pompé, l'une d'elle s'appuyant sur un ressort.

Souvent la bague fixe est en carbone, la bague mobile en stellite ou en carbure de tungstène.

Dans le cas particulier de la figure 5, l'eau qui est dans la garniture, du côté intérieur, est refroidie par un écran thermique : de plus les surfaces de frottement sont également refroidies par une circulation d'eau froide, car une élévation de température de ces surfaces risquerait de provoquer le grippage par évaporation de la pellicule liquide.

Ceci n'est qu'un cas particulier, mais il existe de multiples variantes, comme par exemple deux garnitures mécaniques montées en opposition, avec injection entre ces deux garnitures d'un liquide formant barrage. Ce dernier est choisi pour ne contaminer ni l'atmosphère extérieure, ni le liquide pompé.

Il est impossible ici d'insister plus longuement sur les multiples subtilités d'adaptation et d'application de ces garnitures. Il s'agit indiscutablement d'un problème particulier suffisamment important et capital pour expliquer que certaines firmes s'en sont fait une spécialité et proposent les garnitures aux constructeurs de pompes en fonction de leurs besoins.

Entre le presse-étoupe à tresses et la garniture mécanique, il existe encore des cas intermédiaires, par exemple celui où l'on peut accepter une fuite, mais où la vitesse périphérique empêche d'utiliser les tresses. On peut alors envisager des garnitures de sortie d'arbre à fuite hydraulique limitée, avec ou sans arrosage d'un liquide de barrage (bagues flottantes ou autres dispositifs).

L'attention ayant été ainsi attirée sur le fait qu'à la base de toute application particulière se pose la question du choix des métaux et du type de garniture à

GARNITURES D'ÉTANCHÉITÉ

à tresses

mécanique

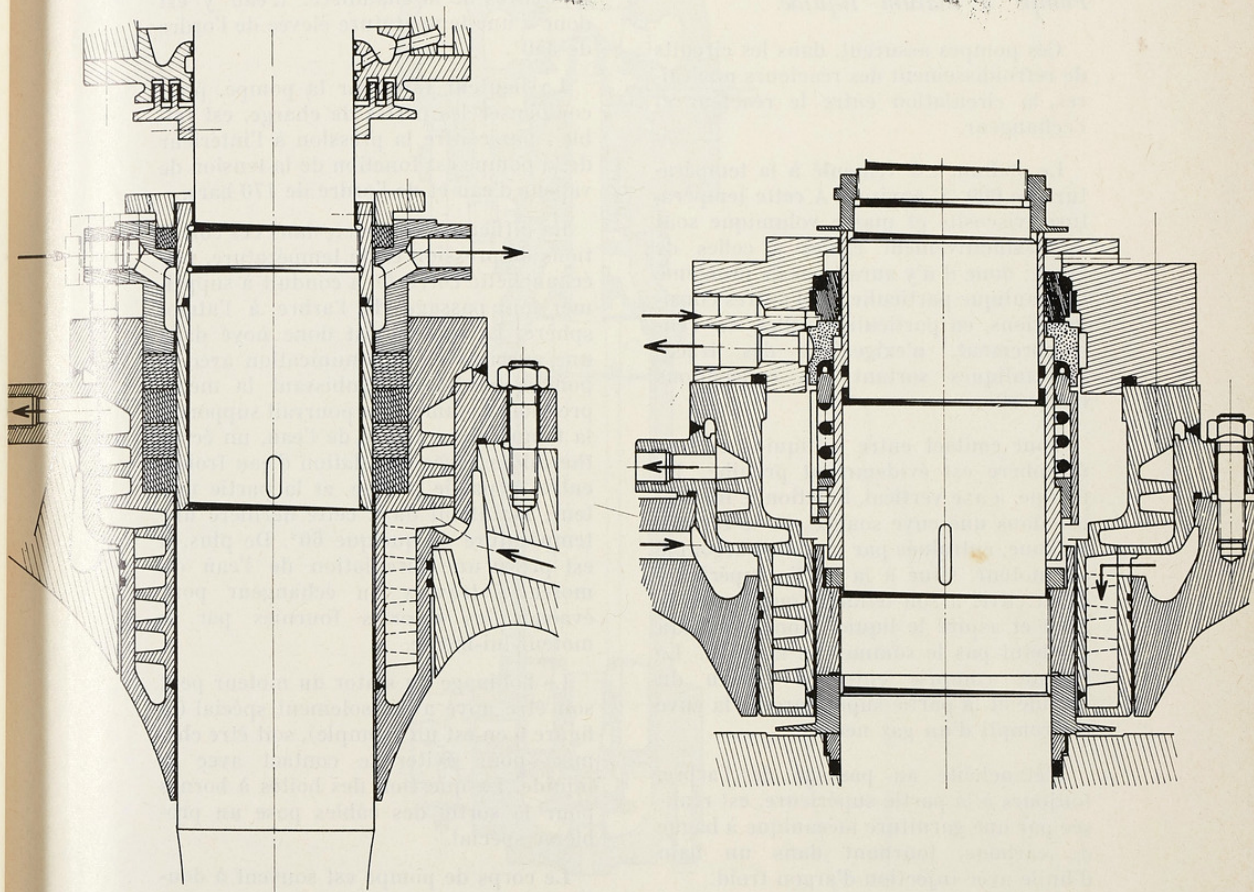


FIGURE 5

utiliser, nous citons quelques cas, parmi les multiples qui pourraient être considérés. Pour cet examen un essai de classification a été adopté en partant des liquides aux plus hautes températures pour aboutir aux liquides aux plus basses températures.

Pompe à sodium liquide.

Ces pompes assurent, dans les circuits de refroidissement des réacteurs nucléaires, la circulation entre le réacteur et l'échangeur.

Le sodium est véhiculé à la température de 600 °C environ. A cette température, viscosité et masse volumique sont approximativement égales à celles de l'eau ; donc il n'y aurait pas de problème hydraulique particulier si d'autres considérations, en particulier celles de l'encombrement, n'exigeaient des tracés hydrauliques sortant des conceptions habituelles.

Tout contact entre le liquide et l'atmosphère est évidemment prohibé. La pompe, à axe vertical, fonctionne immergée dans une cuve soudée sur le circuit. La roue, entraînée par un arbre accouplé au moteur, situé à la partie supérieure de la cuve, a son œillard tourné vers le haut et aspire le liquide dont le niveau n'atteint pas le sommet de la cuve. Le volume compris entre le niveau du liquide et la partie supérieure de la cuve est rempli d'un gaz neutre.

L'étanchéité au passage de l'arbre, toujours à la partie supérieure, est réalisée par une garniture mécanique à bague de carbone, tournant dans un bain d'huile avec injection d'argon froid.

La pompe a un palier inférieur, du type hydrostatique et équilibré par le sodium grâce à une prise faite sur le refoulement de la pompe.

La partie haute comporte un barrage thermique et une protection biologique destinée à arrêter le rayonnement.

Enfin l'ensemble présente une grande

symétrie afin de réduire les effets des dilatations.

Pompe de circulation contrôlée de chaudière.

Ces pompes ont pour but de forcer la circulation de l'eau dans les faisceaux tubulaires de la chaudière. L'eau y est donc à une température élevée de l'ordre de 350°.

La hauteur faite par la pompe, pour compenser les pertes de charge, est faible ; par contre la pression à l'intérieur de la pompe est fonction de la tension de vapeur d'eau et de l'ordre de 170 bars.

La difficulté d'assurer, dans ces conditions de pression et de température, une échancéité correcte, a conduit à supprimer tout passage de l'arbre à l'atmosphère. Le moteur est donc noyé dans une enceinte en communication avec la pompe, c'est-à-dire subissant la même pression. Comme il ne pourrait supporter la température élevée de l'eau, un écran thermique, avec circulation d'eau froide, entre la partie pompe et la partie moteur, maintient dans cette dernière une température de quelque 60°. De plus, il est prévu une circulation de l'eau du moteur à travers un échangeur pour évacuer les calories fournies par le moteur lui-même.

Le bobinage du stator du moteur peut soit être noyé avec isolement spécial (la figure 6 en est un exemple), soit être chemisé pour éviter le contact avec le liquide. La question des boîtes à bornes pour la sortie des câbles pose un problème spécial.

Le corps de pompe est souvent à double volute pour supporter la pression et annuler les efforts radiaux sur la roue, et éviter toute flexion de l'arbre.

Le corps est en acier de fluage, la roue en acier traité à forte teneur en chrome.

Le rotor est équilibré hydrauliquement mais les poussées résiduelles sont prises par une butée à patin double fonctionnant dans l'eau.

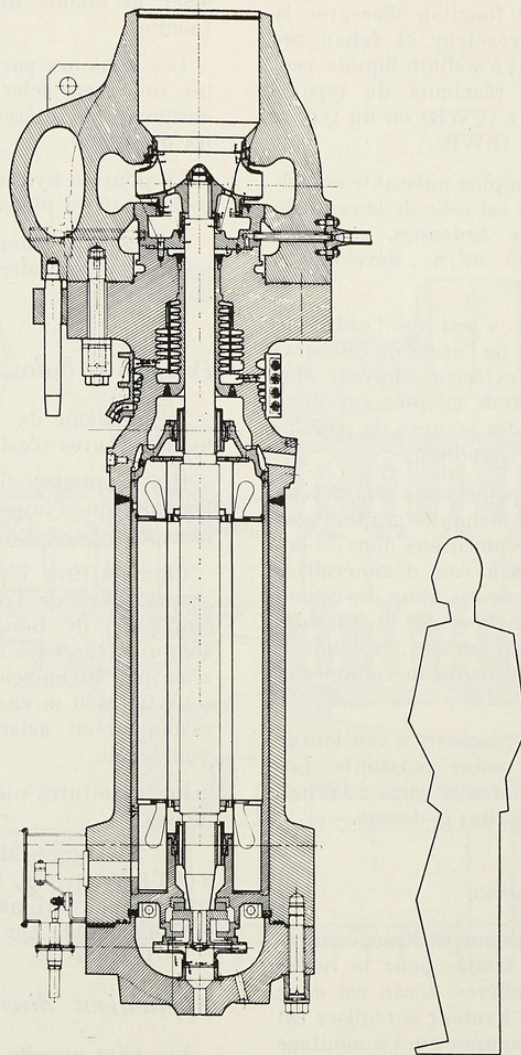


FIG. 6. — Pompe de circulation contrôlée de chaudière
 $Q = 615 \text{ l/s}$ $H = 39 \text{ m}$ $\theta = 350^\circ\text{C}$
Pression de marche = 170 bars Pression d'épreuve = 280 bars
moteur Unelec

(cliché Bergeron)

Pompe à eau déminéralisée de pureté nucléaire.

Elles ont pour fonction d'assurer la circulation entre réacteur et échangeur comme les pompes à sodium liquide, ceci qu'il s'agisse de réacteurs du type à « eau pressurisée » (PWR) ou du type à « eau bouillante » (BWR).

La réalisation la plus puissante actuellement en Europe est celle de la centrale de Chooz dans les Ardennes, avec des groupes de 6 000 m³/h, développant 1 200 kW environ.

La température y est de l'ordre de 300°, les pressions de l'ordre de 170 bars; les fuites vers l'extérieur doivent être nulles. La conception adoptée est donc identique à celle des pompes de circulation contrôlée de chaudière.

En France, les principales réalisations sont avec réacteur à chaînes graphite-gaz carbonique. Les réalisations dans le domaine des pompes à eau déminéralisée sont donc plus modestes. Dans les cas où température et pression sont plus faibles que celles données ci-dessus, on tendrait à revenir à des garnitures mécaniques et moteur dénoyé.

Il y a aussi des réacteurs à eau lourde mais en général moins puissants. Les pompes sont souvent analogues, à l'échelle près, à celles décrites ci-dessus.

Pompes alimentaires.

Ces pompes reprennent l'eau condensée réchauffée et traitée pour la refouler dans les chaudières. L'eau est donc déjà chaude et la hauteur à réaliser est grande. Pour les pompes dites à montage en « baril », roues, diffuseurs et pièces de retour sont à l'intérieur d'une « cartouche » autour de laquelle règne la pression de refoulement. La cartouche est, de ce fait, autoclave, travaille à la compression et est en équilibre thermique. Pour le démontage, elle se retire d'une seule pièce avec le rotor après enlèvement du fond.

Par suite de la nature de l'eau de chaudière qui est traitée, le cuivre est prohibé. Toutes les pièces sont donc en acier, de nuance différente suivant leur fonction.

Les hauteurs par roue étant élevées, les roues en acier à forte teneur en chrome sont entièrement polies ainsi que les diffuseurs.

La poussée hydraulique axiale est absorbée par un plateau d'équilibrage.

La figure 7 montre la coupe d'une pompe alimentaire d'un groupe de 250 MW.

Pompes à hydrocarbures.

Le problème de la manutention des hydrocarbures n'est pas récent.

Il y a toutefois lieu de noter, ici également, que l'importance des installations va en croissant.

Citons à titre d'exemple les groupes surpresseurs de l'oléoduc Hassi-Messaoud près de Bougie. Chaque pompe comprend 2 roues à 2 entrées mises en série par tuyauterie extérieure. Chaque roue fait 400 m environ, et pour cette raison est en acier inoxydable à très grand poli.

Les garnitures sont évidemment mécaniques.

La puissance des groupes est de 8 000 kW environ, les pompes étant entraînées par turbines à gaz, alimentées en combustible par l'oléoduc.

Applications diverses.

Viennent ensuite un nombre considérable d'applications mais qui, quoique très intéressantes, ne présentent pas de novations sensationnelles.

Les domaines des pompes pour produits chimiques ou produits alimentaires se sont caractérisés par l'emploi de matériaux nouveaux (matières plastiques, pyrex, céramiques, etc...).

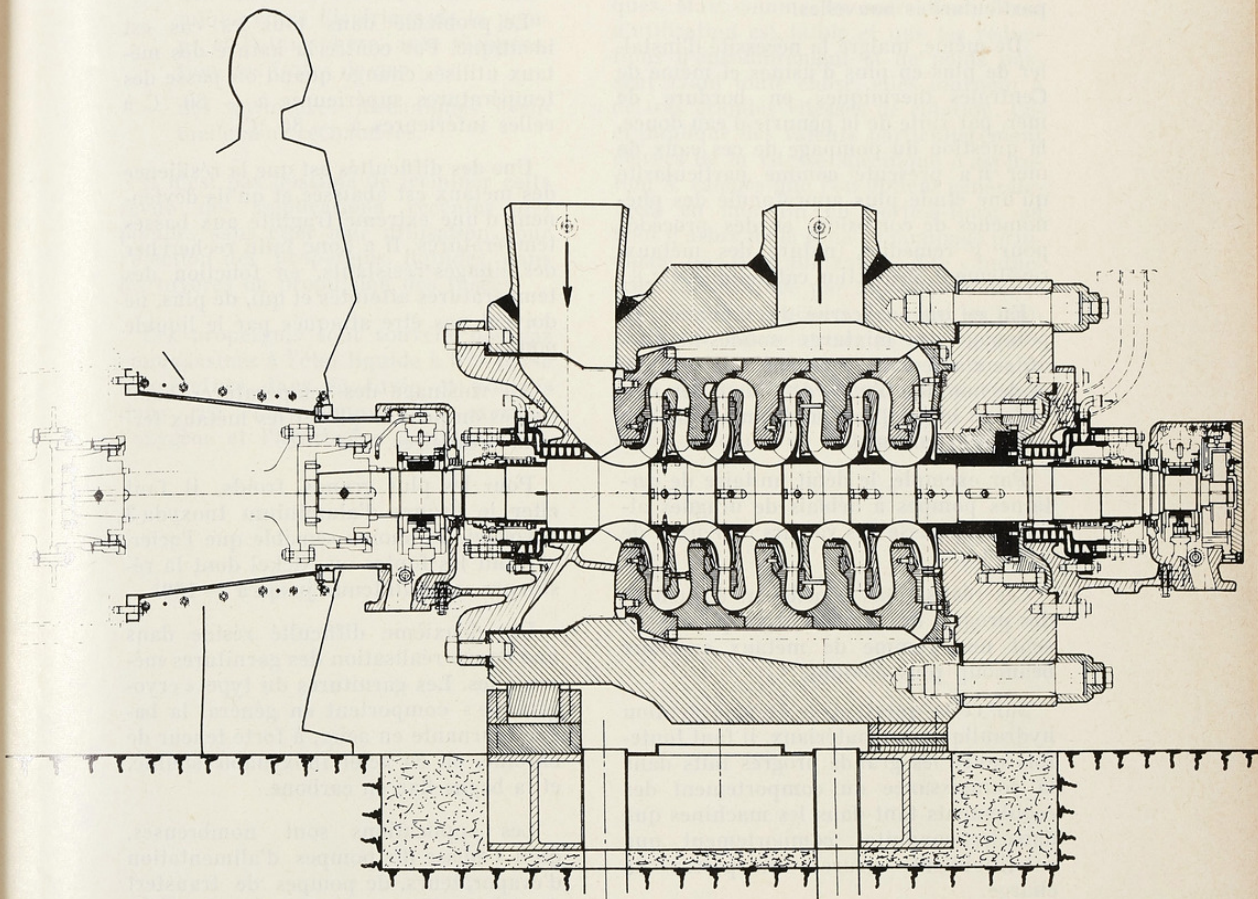


FIG. 7. — Pompe alimentaire plein débit pour groupe de 250 MW
 $H = 2\,120\text{ m}$ $V = 5\,500\text{ tr/min}$ $P = 5\,650\text{ kW}$ $\theta = 162\text{ }^{\circ}\text{C}$

(cliché Bergeron-Rateau)

Bien que le débit des eaux d'égout croisse rigoureusement comme le débit d'eau consommée et que le problème du traitement de ces eaux prend un développement extraordinaire, celui du pompage de ces eaux ne présente guère de particularités nouvelles.

De même, malgré la nécessité d'installer de plus en plus d'usines et même de Centrales thermiques en bordure de mer, par suite de la pénurie d'eau douce, la question du pompage de ces eaux de mer n'a présenté comme particularité qu'une étude plus approfondie des phénomènes de corrosion, et des procédés pour y remédier (nature des métaux, revêtement, protection cathodique, etc.).

En ce qui concerne le domaine du pompage des mixtures solides-liquides où se classent les problèmes de dragage et de manutention hydraulique des matériaux, les réalisations connaissent une grande extension.

Par exemple, le débit unitaire de certaines pompes à déblais de dragues atteint et dépasse des valeurs de l'ordre de 3 000 l/s.

Ces réalisations bénéficient également des progrès de la métallurgie qui autorisent une gamme de métaux spéciaux beaucoup plus étendue.

Sur cette question de la manutention hydraulique des matériaux, il faut toutefois noter les grands progrès faits dans la connaissance du comportement des écoulements tant dans les machines que dans les conduites, comportement que conditionnent usures et pertes de charge.

Nous ne pouvons également qu'évoquer le pompage des pâtes, des liquides visqueux, etc...

LIQUIDES A BASSES ET TRÈS BASSES TEMPÉRATURES.

Entrent dans cette catégorie tous les gaz liquéfiés, que l'on appelle souvent « liquides cryogéniques ».

L'ammoniac, le propane, le butane, le

gaz carbonique par exemple, ont une température de pompage supérieure à -80°C , tandis que l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le méthane et l'éthylène par exemple, ont une température de pompage inférieure à -80°C .

Le problème dans tous les cas est identique. Par contre la nature des métaux utilisés change quand on passe des températures supérieures à -80°C à celles inférieures à -80°C .

Une des difficultés est que la résilience des métaux est abaissée et qu'ils deviennent d'une extrême fragilité aux basses températures. Il a donc fallu rechercher des alliages résistants, en fonction des températures atteintes et qui, de plus, ne doivent pas être attaqués par le liquide pompé.

Au voisinage des températures habituelles on peut employer les métaux ferreux ordinaires.

Pour les plus grands froids, il faut citer le bronze d'aluminium Inoxyda 3 Cryogénique, moins sensible que l'acier, et enfin les fontes au Nickel dont la résilience est maintenue jusqu'à -160° .

Une deuxième difficulté réside dans une bonne réalisation des garnitures mécaniques. Les garnitures du type « cryogénique » comportent en général la bague tournante en acier, à forte teneur de chrome, ou en acier inoxydable stellité, et la bague fixe en carbone.

Les applications sont nombreuses, qu'il s'agisse de pompes d'alimentation d'évaporateurs, de pompes de transfert de gaz liquéfié, de pompes de déchargement, de navires méthaniers, etc...

On retrouve dans les réalisations les principes analogues à ceux suivis pour les pompes à liquides chauds, bien que les conceptions mécaniques soient assez différentes :

- on retrouve en effet le principe de la pompe « barrel » ;
- celui du groupe immergé avec moteur baignant dans le gaz liqué-

fié, ce qui exige pour les bobinages des isolants spéciaux conservant ses propriétés mécaniques et électriques à des températures de l'ordre de -190°C ;

- des enceintes formant écran thermique entre l'intérieur de la pompe et l'atmosphère, avec récupération des fuites de gaz ;
- des garnitures mécaniques éventuellement réchauffées.

Il n'est pas possible de terminer cette revue des applications récentes des pompes sans citer leur utilisation pour l'éjection des propergols liquides dans les tuyères de propulsion des fusées.

Ces propergols sont souvent des gaz emmagasinés à l'état liquide à très basse température dans la fusée et pompés dans cet état, comme par exemple l'oxygène et l'hydrogène liquides utili-

sés comme couple propergolique dans plusieurs types de fusées, tel le deuxième étage du « Centaure ».

Ces pompes ont toutes les caractéristiques des pompes à liquides cryogéniques. Mais comme, en outre, leur durée d'utilisation est faible et que les réductions d'encombrement et de poids passent avant toute chose, elles tournent à de très grandes vitesses de rotation. Ceci implique des valeurs particulièrement élevées de la vitesse spécifique d'aspiration S , valeurs que l'on obtient généralement en montant en porte-à-faux, en bout d'arbre de la roue de pompage principale, une roue alimentaire dite « inductrice », constituée par une sorte d'hélice à 2 pales très couchées. Ici aussi les hauteurs par roue sont très élevées, de sorte que l'on trouve réunis dans ces machines, quoiqu'à une échelle relativement restreinte, les principaux progrès technologiques actuels en matière de pompe.

La Cryogénie (*)

par M. JEAN-TONY JENN

*Directeur de la Recherche
de la Société L'Air Liquide*

INTRODUCTION

C'est vers les très basses et les très hautes températures que L'Air Liquide a développé son effort de recherches aussi bien d'ailleurs que son expansion industrielle depuis le début du siècle. A notre époque, la science et la technologie s'efforcent d'élargir pour l'homme les frontières de la connaissance, qu'il s'agisse de l'infiniment petit à l'échelle sub-atomique ou de l'infiniment grand à l'échelle astronomique ; des états infiniment subtils de la matière dans l'ultra-vide ou des hyperpressions ou même encore de ces états mystérieux ultracondensés de la matière que l'on soupçonne

dans certains astres ; ou enfin des états plasmoides, c'est-à-dire des températures extrêmement élevées que l'on découvre dans les étoiles et que l'homme commence maintenant à reproduire par explosions thermonucléaires, ou des basses et très basses températures au fur et à mesure que l'on tend vers le zéro absolu.

Ce dernier domaine en particulier prend aujourd'hui une importance scientifique et industrielle de plus en plus grande ; c'est de lui que je voudrais vous entretenir aujourd'hui.

(*) Conférence prononcée le 17 novembre 1966, à l'occasion de la Cérémonie de remise du Grand Prix Lamy à la Société L'Air Liquide, sur rapport de M. Jean Lecomte, Membre de l'Institut, Président de la Société d'Encouragement. Le texte de ce rapport sera publié ultérieurement.

I

DÉFINITIONS GÉNÉRALES

LA CRYOGENIE

Je m'aperçois que j'ai choisi pour titre de ma conférence le terme « la cryogénie » qui n'est peut-être pas familier aux oreilles de tous. « Cryogénie » concerne, étymologiquement, ce qui engendre le froid. Un réfrigérateur ménager est un appareil cryogénique et toutes les ménagères font donc de la cryogénie sans le savoir. En réalité, près du zéro centigrade, on utilise plus volontiers le terme « frigorifique » d'origine latine, et le terme « cryogénique » a été, dès l'origine, réservé à des températures plus basses qui n'avaient guère, jusqu'en 1940, d'autres applications que la séparation des constituants de l'air liquide telle que l'avait étudiée Georges Claude, dès 1896. En fait, le terme « cryogénie » englobe maintenant, non seulement la production de ces basses températures, mais aussi leur maintien et leur utilisation ; l'industrie cryogénique concerne donc aussi bien la production du froid à ces bas niveaux que la mise en œuvre des techniques d'isolation thermique ou l'utilisation de ces basses températures.

LES « BASSES TEMPERATURES »
ET QUELQUES-UNS
DE LEURS USAGES

En vous apportant cette définition, je m'aperçois qu'il manque encore une précision pourtant capitale : qu'appelle-t-on basses températures ? La réponse à cette question varie considérablement suivant la personne à qui on la pose. En réalité, les différents domaines cryo-

géniques sont, dans la terminologie actuelle, ceux qui s'étendent depuis la température ambiante jusqu'au zéro absolu, $-273,14^{\circ}\text{C}$, que l'on sait par définition impossible à atteindre, mais dont on peut essayer indéfiniment de s'approcher.

Il y a peu d'années, on pouvait diviser ces domaines cryogéniques de la manière suivante :

- un domaine médical allant depuis la température ambiante jusqu'au voisinage du 0°C ;
- un domaine du froid alimentaire, limité par la glace carbonique (-80°C) ;
- celui des « basses températures » limité souvent à la liquéfaction de l'air, à -196°C (température de l'azote liquide bouillant) ;
- un autre domaine, aux plus basses températures, d'un intérêt purement scientifique, depuis -196°C jusqu'à -273°C environ.

L'évolution de la science et de la technique, depuis une vingtaine d'années, a suscité un renouvellement profond des industries du froid.

Au domaine alimentaire se greffe peu à peu un domaine biologique d'importance croissante, et les températures nécessaires à ces activités s'étendent maintenant jusqu'à -196°C .

D'autre part, la zone, désertique auparavant, entre -80°C et -196°C , se

couvre peu à peu d'activités nouvelles : liquéfaction de l'éthylène ($-103,8^{\circ}\text{C}$), du méthane (-160°C), etc...

QUELQUES EXEMPLES DE L'EMPLOI DES « BASSES TEMPERATURES »

Tout le monde connaît bien sûr l'utilisation des basses températures dans le domaine alimentaire, et l'on commence à trouver des congélateurs dans les magasins d'alimentation ou même chez les particuliers, qui conservent les denrées à des températures de l'ordre de -20°C .

On sait déjà aussi que l'on s'oriente vers des températures plus basses qui assurent une meilleure conservation, et que l'on emploie déjà couramment la glace carbonique à -80°C ou même parfois l'azote liquide à -196°C , comme le fait la Compagnie Air France, avec le concours de L'Air Liquide, pour la conservation de plats cuisinés.

Le transport de matières premières importantes de l'industrie se fait aussi à des températures de plus en plus basses. L'éthylène et le méthane se transportent maintenant couramment sous forme liquide, dans des navires spécialement conçus, à des températures de -102 et -160°C respectivement. L'aventure spatiale est elle-même liée à l'emploi des fluides cryogéniques puisque les réacteurs des fusées géantes utilisent pour certains étages l'oxygène et l'hydrogène liquides qui sont stockés à bord de l'engin, l'oxygène à -183°C et l'hydrogène à -252°C . Demain les avions eux-mêmes utiliseront probablement l'hydrogène liquide ou le méthane liquide comme combustibles.

Les utilisations, en physique, de l'hélium liquide à -269°C sont maintenant banales et notre société construit « à la chaîne », peut-on dire, des petits liquéfacteurs d'hélium produisant 7 litres/heure de ce liquide. Elle va démarrer dans quelque temps un appareil industriel qui produira 100 litres/heure. Les

savants tendent de plus en plus vers le zéro absolu qui est, rappelons-le, à $-273,14^{\circ}\text{C}$, afin de mieux comprendre la structure intime de l'état solide de la matière. Dans certains laboratoires de recherches, on est parvenu à des températures qui ne sont distantes de cette limite inaccessible que de $1/10\,000^{\circ}$ ou peut-être même $1/1\,000\,000^{\circ}$.

Vous me pardonnerez de ne pas m'étendre ici davantage sur ce caractère « inaccessible » du zéro absolu. Il semblerait bien sûr à un profane qu'on en soit très proche, si l'on n'en est plus éloigné que de $1/1\,000\,000^{\circ}\text{C}$. Il n'en est rien, en réalité, comme les thermodynamiciens le savent bien, car notre échelle usuelle des températures est illusoire : en effet, l'énergie qu'il faut dépenser pour descendre de 1° devient de plus en plus grande à mesure qu'on descend vers les basses températures. Chacun sait à quel point les réfrigérateurs domestiques dépensent peu d'énergie, c'est tout au moins ce que leur publicité nous assure ! L'obtention d'azote liquide à -196°C est bien plus coûteuse en énergie, celle d'hydrogène liquide à -253°C l'est davantage, celle de l'hélium liquide à -269°C bien plus encore, et cette dépense deviendrait infinie si l'on prétendait atteindre cette barrière de la nature qu'est le zéro absolu.

L'EFFORT FRANÇAIS DANS CE DOMAINE NOUVEAU

Après avoir esquissé devant vous l'échelle fascinante des températures des divers domaines cryogéniques, je voudrais vous dire quelques mots de l'effort français : l'emploi nouveau de ces basses et très basses températures au-dessous de, disons -80°C , date de l'époque 1940-1945.

C'est, en effet, à cette époque que, dans un certain nombre de pays, on a trouvé des usages nouveaux à ces très basses températures qui suscitent maintenant par le monde un intérêt considé-

nable. Avant la guerre, il n'existait aux Etats-Unis qu'une ou deux sociétés qui s'occupaient des très basses températures ; il en existe maintenant plusieurs dizaines.

Il y avait, avant la guerre, dix laboratoires aux Etats-Unis qui s'occupaient de très basses températures ; il y en a sans doute, maintenant, plus de cent.

La France ne demeure pas inactive dans ce domaine : il n'existait avant la guerre qu'un seul laboratoire utilisant l'hydrogène liquide : le laboratoire de Bellevue du Centre National de la Recherche Scientifique alimenté en partie grâce à un petit liquéfacteur fourni par notre Société. Il existe en France maintenant plusieurs dizaines de centres publics ou privés qui utilisent l'hélium liquide, d'ailleurs fourni aussi la plupart du temps par L'Air Liquide ou produit grâce à des liquéfacteurs vendus par une de ses filiales ou ses concurrents.

En plus de ces nombreux laboratoires universitaires, centres de recherches nucléaires, centres du Centre National de la Recherche Scientifique ou laboratoires de recherches privés, je tiens à faire une mention spéciale de l'ensemble des moyens de recherches, peut-être unique au monde, qui s'est constitué à Grenoble : un Centre de Recherches Cryogéniques à l'intérieur du Centre de Recherches Nucléaires de Grenoble, disposant en particulier des moyens d'irradiation les plus modernes aux très basses températures ; un Institut de Recherches aux très basses températures dépendant de l'Université de Grenoble et le Centre d'Etudes Cryogéniques de la Société L'Air Liquide, sans parler du laboratoire purement universitaire en cours de construction sur le nouveau Campus de l'Université. Ces quatre organismes, qui sont loin d'ailleurs d'avoir atteint leur vitesse de croisière, travaillent en étroite coopération et emploient dès maintenant plusieurs centaines de personnes.

II

LES APPLICATIONS DE LA CRYOGÉNIE

Il serait trop long de décrire même sommairement les principales applications scientifiques ou industrielles des basses et très basses températures ; aussi bien le domaine de la cryogénie s'enrichit chaque année d'applications nouvelles dont il n'est pas toujours aisé de prévoir l'ampleur des développements.

Je citerai seulement les principales de ces applications en me bornant à développer à titre d'exemple deux d'entre elles.

LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE LA CRYOGENIE

1°) Production des matières premières.

Certaines matières premières de base de l'industrie se présentent sous forme gazeuse aux conditions habituelles de

température et de pression (voir tableau). Parmi les divers procédés d'extraction ou de purification de ces matières premières, le recours aux séparations

aux basses et très basses températures n'est pas des moins importants et doit être considéré comme un des principaux procédés mis en œuvre par le génie chi-

Corps dont les températures d'ébullition à la pression atmosphérique sont inférieures à -40°C

Gaz	Température d'ébullition (en $^{\circ}\text{C}$)	Température critique (en $^{\circ}\text{C}$)	Pression critique (en bars)
Hélium (He_3)	— 270,0	— 269,9	
Hélium (He_4)	— 268,9 (3)	— 267,9 (3)	2,29 (3)
Hydrogène ($p\text{-H}_2$)	— 252,9 (3)	— 240,1 (4)	12,9 (4)
Hydrogène ($n\text{-H}_2$)	— 252,8 (3)	— 239,9 (4)	13,1 (4)
Deutérium	— 249,6		
Néon	— 245,9 (4)	— 228,7 (4)	27,2 (1) (4)
Azote	— 195,8 (4)	— 147,1 (4)	33,9 (4)
Air	— 194,4 (5)	— 140,7 (3)	37,7 (3)
Oxyde de Carbone	— 191,5 (4)	— 140,2 (1) (4)	35 (1) (4)
Argon	— 185,7	— 122,2	48,6 (4)
Oxygène	— 182,9 (4)	— 118,7	50,7 (4)
Méthane	— 161,4 (4)	— 82,5 (4)	46,4 (4)
Krypton	— 152 (1)	— 63,1 (3)	54,7 (3)
Oxyde azotique	— 151,7	— 94 (3)	65,8 (3)
R. 14 (CF_4) (6)	— 127,9	— 45,5	37,3
Xénon	— 108	+ 16,6 (3)	58,9 (3)
Ethylène	— 103,7	+ 9,7 (3)	51,6 (3)
Protoxyde d'azote	— 89,1 (1)	+ 36,5 (3)	72,6 (3)
Ethane	— 88,6 (1)	+ 32,1 (3)	49,4 (3)
Acétylène	— 84 (1) (2) (3)	+ 35,9 (3)	62,8 (3)
R. 13 (CClF_3) (6)	— 81,3	+ 28,9	38,7
Gaz carbonique	— 78,4 (2)	+ 31,1 (3)	73,9 (3)
Hydrogène sulfuré	— 60,4	+ 100,4 (3)	90,0 (3)
Propylène	— 47 (1) (3)	+ 92,3 (3)	45,6 (3)
Propane	— 42,1 (3)	+ 95,6 (1) (3)	43,5 (1) (3)
R. 22 (CHClF_2) (6)	— 40,8	+ 96,0	49,3

(1) Valeur donnée simplement à titre indicatif.

(2) Température de sublimation.

(3) *Handbook of chemistry and physics*, 43^e édition (1961-1962), p. 764 à 1200 et 2339 à 2431. Chemical Rubber Publishing Co.

(4) Properties of materials at low temperature (phase 1). A Compendium. Pergamon Press 1961, p. 6000 et suivantes.

(5) Point de rosée : — 191,4 $^{\circ}\text{C}$.

(6) Il s'agit de Fréon.

mique. Rappelons que la production française d'oxygène pour la métallurgie et plus particulièrement la sidérurgie a dépassé 750 000 t pour l'année 1965, c'est-à-dire sensiblement plus que la production d'aluminium par exemple. Un chiffre encore pour fixer les idées : les plus grosses unités de production d'oxygène ont maintenant une capacité de production de 1 000 tonnes/jour.

Les mêmes techniques s'appliquent à la séparation de mélanges gazeux autres que l'air pour isoler leurs constituants, soit sous forme gazeuse, soit sous forme liquide (mélange de synthèse d'ammoniac, hydrogène, éthylène, hélium, etc...).

2°) *Transport et stockage des gaz liquéfiés.*

Un certain nombre de matières premières sont donc extraites ou purifiées grâce à l'intervention des basses ou très basses températures ; celles-ci interviennent encore pour leur transport et leur stockage qui se font bien souvent sous forme liquide, ce qui permet un gain spectaculaire de poids et d'encombrement par rapport à la technique plus ancienne des bouteilles de gaz comprimés. C'est en particulier le cas pour l'oxygène et l'azote.

Par ailleurs, la liquéfaction du méthane est devenue maintenant une importante industrie, tandis que des navires méthaniers commencent à sillonner les mers, transportant ce fluide à -160°C dans des réservoirs spécialement conçus.

L'Air Liquide vient de mettre au point un cycle de liquéfaction nouveau, dit « cycle à cascade incorporée », particulièrement intéressant dans le cas de la liquéfaction du méthane. Ce cycle original a fait l'objet de brevets déposés en France et dans divers pays étrangers, notamment aux Etats-Unis.

Une usine-pilote a été construite à

Nantes, à la Station Expérimentale de Gaz de France.

Nous construisons actuellement aux Etats-Unis une usine suivant ce cycle pour stocker le gaz naturel à l'état liquide et le revaporiser au moment des pointes de consommation.

3°) *Conservation des organismes vivants.*

Les basses et très basses températures viennent de faire irruption dans le domaine biologique et médical ; on peut maintenant conserver certains organismes à température de l'azote liquide pendant une longue durée, sans détérioration notable. C'est notamment le cas de sections d'artères.

On s'efforce actuellement de mettre au point une technique de conservation indéfinie du sang à la température de l'azote liquide ; il semble que l'on soit assez proche du succès.

On se rendra compte de l'importance pratique d'une telle question si l'on se rappelle que le sang conservé par les moyens actuels ne se garde guère plus de trois semaines. L'effort admirable des donneurs de sang bénévole suffit en fait à peine à faire face aux besoins courants sans qu'on puisse constituer à l'avance de réserves pour des besoins plus importants (accidents de voitures en août ou catastrophe majeure telle qu'un tremblement de terre).

D'une façon générale, le comportement des substances biologiques en fonction de la température a fait, depuis dix ou quinze ans, l'objet d'études biophysiques et biochimiques qui permettent maintenant de soumettre les phénomènes réels, avec une approximation raisonnable, aux équations tirées de la thermodynamique physique et chimique.

Ce passage du qualitatif ou quantitatif, dans un domaine essentiellement biologique, est à noter : peut-être le froid sera-t-il, par la simplification et la clarification qu'il apporte aux phénomènes,

un moyen de jeter le pont, si nécessaire, entre la physique et la chimie modernes et les sciences de la vie.

Ces études dans le domaine biologique ont conduit à la mise au point d'outils chirurgicaux nouveaux : les cryobistouris qui permettent maintenant d'obtenir des rémissions spectaculaires dans le traitement de certaines affections très graves, en chirurgie du cerveau (par exemple certaines formes de la maladie de Parkinson), ou plus récemment encore dans la chirurgie de l'œil.

**

Mais il est un autre aspect que je voudrais souligner dans ces applications de basses et très basses températures dans le domaine biologique et médical : conserver des organismes vivants tels que des fragments d'artères aujourd'hui, et demain des cornées, après-demain sans doute des organes plus complexes comme le rein ou le foie, qu'est-ce donc sinon suspendre pendant un temps indéterminé la vie dans ces organes ?

Ce phénomène de l'interruption de la vie provoquée par le froid convenablement et suffisamment poussé, sans que subsiste aucun des signes qui caractérisent soit la vie, soit la mort, l'immortalité par le froid, pourrait-on dire, pose sans doute des problèmes aussi difficiles au philosophe qu'au physicien et au biologiste !

Comment qualifier cette vie suspendue, « latente » suivant l'expression du Professeur Jean Rostand ? Déjà l'on conserve dans l'azote liquide, de façon courante, les semences d'animaux comme celles de taureaux ou de dindons pour améliorer les races animales. Le Professeur Louis Rey écrit : « Il a été possible de préparer un moule intact, dont toute vie a disparu, mais dans lequel pendant le dégel une vie nouvelle va s'écouler progressivement au feu de l'énergie thermique. »

La conquête de ce nouveau domaine des basses et très basses températures suscite donc une réflexion entièrement nouvelle sur la nature même de la vie.

4°) Conservation et transport des denrées alimentaires.

L'azote ou l'air liquide peuvent être avantageusement employés pour le refroidissement des camions ou des wagons frigorifiques à la place des groupes frigorifiques traditionnels. L'intérêt de cette nouvelle technique est multiple ; parmi les avantages principaux, on peut citer les suivants :

a) L'ensemble mécanique des camions est très simplifié puisque l'ensemble compresseur-moteur est remplacé par un réservoir de liquide cryogénique avec un thermostat et une ligne de distribution de liquide : dès que la température de l'enceinte à maintenir froide dépasse le niveau prescrit, une injection de liquide se produit à partir du réservoir par simple ouverture d'une vanne thermostatée et l'appoint de liquide, en se vaporisant, produit le refroidissement désiré.

b) Meilleure conservation de certaines denrées alimentaires, notamment les produits frais puisque la température qu'on peut obtenir est plus basse que par l'emploi de compresseurs et que l'atmosphère inerte (si on emploie l'azote liquide) empêche tout risque d'oxydation, c'est-à-dire de vieillissement des denrées.

Cette technique toute récente connaît un développement très rapide aux Etats-Unis et en France maintenant.

On peut également utiliser ce mode de refroidissement pour obtenir une congélation ultra-rapide de certains produits alimentaires ou de certains plats cuisinés ; cette technique, encore plus récente que la précédente, paraît très prometteuse.

5°) Divers emplois industriels des basses et très basses températures.

Les fluides cryogéniques trouvent des applications diverses de plus en plus nombreuses dont je ne peux citer, à titre d'exemple, que quelques-unes en passant, car leur nombre s'accroît chaque année :

L'emmanchement par contraction est couramment pratiqué dans l'industrie automobile, les pièces mâles de soupape étant contractées par refroidissement dans l'azote liquide. Certains aciers sont trempés à l'azote liquide. La solidification des sols et des canalisations à l'azote liquide offre, dans certains cas, une solution commode à des problèmes de génie civil.

La liste des applications des très basses températures dans l'industrie s'accroît chaque année.

6°) Le cryopompage.

Le principe du cryopompage est le suivant : on sait que la tension de vapeur d'un gaz décroît avec la température : à -253°C par exemple, la tension de vapeur de l'argon est de 10^{-12} mm de Hg ; à -269°C , température facile à atteindre grâce à l'hélium liquide, elle n'est plus que de 10^{-20} mm de Hg. Si donc, disposant d'argon parfaitement pur, on en remplit une enceinte parfaitement étanche, puis qu'on refroidisse cette enceinte à -253°C , l'argon s'y solidifie et sa tension de vapeur étant de 10^{-12} mm de Hg, c'est cette pression déjà très basse qui règne dans l'enceinte ; à -269°C , on obtiendrait, de même, une pression de 10^{-20} mm de Hg. (L'emploi d'azote, au lieu d'argon, conduirait à des résultats voisins.)

Bien entendu ces valeurs sont purement théoriques en raison de divers facteurs qui s'opposent à l'obtention de tel

vide : dégazage des parois, impossibilité d'avoir des fluides parfaitement exempts d'impuretés, etc... Malgré ces restrictions, on voit, par cet exemple, le nouvel outil très puissant dont on dispose, grâce aux très basses températures, pour produire des vides très poussés. On peut noter, en passant, l'importance d'obtenir, dans ce cas particulier, de l'argon totalement exempt d'hydrogène ou d'hélium, puisque des traces, même infimes, de l'un de ces gaz créeraient des pressions partielles notables ; il s'agit là d'un problème de purification extraordinairement ardu.

Une application particulièrement spectaculaire du cryopompage se trouve dans les chambres de simulation spatiales dans lesquelles on essaie de reproduire, autant que possible, les conditions existant dans l'espace interplanétaire, c'est-à-dire, à peu près, une température de -270°C (face non ensoleillée) et une pression de 10^{-16} mm de Hg.

7°) Chimie des basses températures.

Il s'agit là d'une branche nouvelle de la chimie encore assez peu connue. Rappelons, par exemple, que le caoutchouc synthétique très utilisé dans l'industrie, par exemple pour la fabrication des chambres à air de véhicules (copolymère isobutylène, isoprène) est polymérisé à -95°C pour obtenir les conditions optimales de poids moléculaire et de régularité.

La chimie dans l'ammoniaque liquide entre -30°C et -80°C présente un grand intérêt scientifique et déjà technologique. Signalons enfin que certains composés, fort intéressants, ne peuvent exister stables que sous des températures basses : c'est par exemple le cas des composés d'addition d'oxygène et de fluor : O_3F_2 - O_4F_2 - O_5F_2 . On a récemment isolé, de façon certaine O_5F_2 et sans doute O_6F_2 , stables seulement aux très basses températures. Ces composés

sont, bien entendu, des oxydants extrêmement puissants.

L'Air Liquide n'a pas manqué de s'intéresser dans ses laboratoires de recherches à ces divers aspects de la chimie aux basses températures.

8°) *Electromagnétisme et électronique.*

a) ELECTROMAGNÉTISME « CLASSIQUE » A TRÈS BASSE TEMPÉRATURE

On sait que la résistance des matériaux conducteurs (cuivre, aluminium, etc...) décroît avec la température : la résistivité du cuivre à la température de l'hydrogène liquide (20 °K) n'est plus que le 1/100^e de sa valeur à la température ambiante. Elle n'est plus, à cette même température, que le 1/800^e de sa valeur à la température ambiante pour l'aluminium dont on songe maintenant à utiliser cette propriété pour la réalisation de cryomachines électriques et, notamment, de transformateurs plus compacts et plus économiques que les transformateurs actuels.

Des travaux sont en cours, par exem-

ple, au Centre d'Etudes Cryogéniques de L'Air Liquide à Sassenage, où un premier prototype a été réalisé en 1964 en coopération avec les Sociétés Alsthom et Pechiney.

b) LA SUPRACONDUCTIVITÉ

Le phénomène de supraconductivité se produit pour certains matériaux à des températures avoisinant celles de l'hélium liquide ; il consiste en une disparition complète de toute résistance électrique, et permet d'envisager des versions révolutionnaires de diverses machines, par exemple, des calculateurs électroniques, des moteurs électriques, des transformateurs supraconducteurs, des lignes de transport de courant, etc...

c) DIVERS DISPOSITIFS ÉLECTRONIQUES

Sans atteindre jusqu'à ces réalisations, dont la mise au point prendra encore plusieurs années, il existe dès à présent de petits réfrigérateurs couramment utilisés en électronique pour les applications, soit civiles, soit militaires : on peut citer à titre d'exemple les cellules infra-rouges à azote ou à néon liquide pour les têtes chercheuses de fusées.

III

L'EFFORT DE RECHERCHES DU GROUPE « AIR LIQUIDE »

Le passage des découvertes nouvelles de la recherche pure, faite généralement dans les laboratoires d'Etat, jusqu'au stade de l'assimilation par l'industrie est une étape difficile. Chacun sait, en effet, que cette étape que l'on appelle souvent le « développement », traduction un peu

« franglaise » du mot anglais « development » est aussi la phase la plus coûteuse. Bien entendu, L'Air Liquide est profondément engagé aussi bien dans une recherche semi-fondamentale que dans cette phase si délicate de la recherche et du développement industriels.

C'est là la tâche principale du Centre d'Etudes Cryogéniques de Grenoble dont l'effectif dépasse maintenant quatre cents personnes.

Evidemment, il nous faut constamment choisir entre différents thèmes de recherches, de manière à entreprendre autant que possible celles qui seront susceptibles de résultats rémunérateurs puisque aussi bien un des buts d'une grande société comme L'Air Liquide est de faire des profits. C'est dire qu'il est constamment demandé aux personnes qui ont la charge d'élaborer ce programme de s'efforcer d'avoir comme une vision de l'avenir qu'il n'est pas toujours possible de déduire d'un rigoureux enchaînement de raisonnements cartésiens.

Albert Einstein a dit : « L'imagination est plus importante que la connaissance. Car le savoir est limité, tandis que l'imagination embrasse l'univers entier, stimulant le progrès, et donnant naissance à l'évolution. »

De son côté, le célèbre savant russe Kapitza, connu également par ses travaux dans le domaine des Très Basses Températures, a écrit en s'insurgeant contre la routine administrative qui, dit-il, prévaut en U.R.S.S. : « Chez nous on pense souvent qu'il suffit de donner un ordre prescrivant l'assimilation de telle ou telle technique pour que le processus de mise en application soit, d'ores et déjà, garanti. Mais l'analyse montre

que ce processus ne peut être envisagé simplement sous l'angle d'un acte administratif ; il faut l'aborder plutôt comme " un poème pédagogique ". »

Il me semble très stimulant qu'un grand savant russe évoque la poésie dans de telles circonstances. De toute manière, la découverte n'étant plus au terminus provisoire de chaque science, elle croise au carrefour de techniques multiples, mais très dissemblables. Ce terme imagé de « carrefour » dû à M. Louis Armand dépeint à merveille la situation qui est celle de notre Groupe. La production des basses températures, c'est-à-dire, rappelons-le, la cryogénie au sens étymologique du terme, n'est jamais une fin en soi. Les basses températures sont toujours produites en vue d'un but déterminé dans une branche particulière des sciences et des techniques.

**

Il ne saurait être question, dans les quelques minutes qui nous restent, de décrire l'ensemble des activités du Centre d'Etudes Cryogéniques de L'Air Liquide. Je me bornerai à dire quelques mots de deux axes de recherches particulières qui sont l'objet de notre attention particulière, dans les deux domaines suivants :

- la cryochirurgie,
- le cryopompage.

LA CRYOCHIRURGIE

Depuis 1948, le Professeur Mazars et son équipe ont étudié à Paris, à l'hôpital Sainte-Anne, les effets de la réfrigération et de la congélation localisées des structures cérébrales dans le but d'applications thérapeutiques parmi lesquelles, en premier lieu, le traitement chirurgical de l'épilepsie.

Les premières investigations furent faites avec du chlorure d'éthyle et de la neige carbonique. Depuis 1960, l'azote liquide est presque exclusivement utilisé.

L'Air Liquide a donc été amené à entreprendre un programme de recherches en coopération étroite avec le Professeur Mazars, avec deux buts bien précis :

— une meilleure compréhension des phénomènes

— la réalisation de matériels chirurgicaux appropriés.

1. - Recherche fondamentale pour une meilleure compréhension.

Le rôle du froid en chirurgie a fait l'objet de recherches systématiques depuis plusieurs années. Trois phénomènes ont été mis en évidence dans la zone qui nous intéresse :

- le refroidissement,
- la cryocautérisation,
- la cryoextraction.

LE REFROIDISSEMENT

L'activité des tissus peut être bloquée temporairement par action du froid. Si le refroidissement est modéré, les cellules reprennent leur activité normale dès le réchauffement. En neurologie, par exemple, un refroidissement modéré et de courte durée de cellules nerveuses à l'aide d'une sonde froide, provoque une paralysie temporaire de la fonction correspondante et permet de vérifier si la sonde est au contact des cellules que l'on désire traiter.

LA CRYOCAUTÉRISATION

La congélation à l'azote liquide permet la destruction de structures cérébrales profondes dont la localisation et l'étendue sont parfaitement contrôlables, ceci tout en respectant les tissus adjacents et même certaines formations cellulaires voisines, saines, au sein de la zone congelée. La destruction par congélation présente des avantages sur les exérèses chirurgicales classiques (destruction par électro-coagulation ou par irradiation) car elle offre une plus grande sécurité quant à la localisation précise de la zone à détruire.

LA CRYOEXTRACTION

Lorsqu'on applique une sonde portée à basse température sur un tissu, il se produit des phénomènes d'adhérence entre la pointe froide de la sonde et la zone congelée. Dans certains cas particuliers, cette adhérence permet l'extraction du tissu congelé. Ce procédé s'est montré souvent supérieur aux traitements chirurgicaux classiques, tant du point de vue technique opératoire que des résultats obtenus.

2. - Réalisation de matériels chirurgicaux appropriés

Le Centre d'Etudes Cryogéniques de Sassenage s'est appliqué, en liaison avec les services commerciaux, à la réalisation d'une sonde chirurgicale (le « Cryal ») permettant une congélation rapide et très localisée de tissus normaux ou pathologiques.

De nombreux problèmes techniques ont dû être résolus, notamment la réalisation d'aiguilles fines, isolées thermiquement sur toute leur longueur et comportant une extrémité refroidie à l'azote liquide, dont la température peut atteindre 80 °K.

L'azote liquide qui assure le refroidissement est contenu dans un réservoir solidaire de l'aiguille. L'ensemble se manipule comme une grosse seringue hypodermique.

Le traitement par cryochirurgie est, dès à présent, utilisé en :

- neurologie : maladie de Parkinson, épilepsie ;
- ophtalmologie : cryocautérisation de la cornée, extraction du cristallin, extraction de l'humeur vitrée ;
- ophtalmo - laryngologie : papillomes.

Son emploi est, d'ores et déjà, envisagé en outre en cancérologie et pour d'autres traitements en ophtalmologie.

LE CRYOPOMPAGE

1. - Définitions et généralités.

« Faire le vide » dans une enceinte consiste à diminuer le nombre des molécules du gaz contenu dans cette enceinte.

Dans la pratique, on désigne arbitrairement les différents stades de vide comme suit :

vide grossier ...	de 760 à 1 torr
vide moyen	de 1 à 10^{-3} torr
vide poussé	de 10^{-3} à 10^{-7} torr
ultra-vide	au-delà de 10^{-7} torr

2. - Moyens de faire le vide.

Le vide grossier et le vide moyen peuvent être obtenus à l'aide de pompes mécaniques dites pompes primaires : parmi les types les plus courants, on peut citer : les pompes à palettes et les pompes Roots. Ensuite, le vide poussé est obtenu habituellement par l'action de pompes à diffusion d'huile qui permettent actuellement, avec l'emploi d'huiles de silicones, de descendre jusqu'à 10^{-8} - 10^{-9} torr. Au-delà, il est nécessaire d'employer d'autres types de pompes. Ces pompes peuvent être des pompes ioniques, avec ou sans vaporisation de titane, des pompes moléculaires, des cryopompes.

Il faut citer également, parmi les moyens de pompage couramment employés, les tamis moléculaires refroidis aux températures cryogéniques.

Il est à noter que l'ultra-vide obtenu par les pompes ioniques, les pompes moléculaires et les cryopompes est un « vide-propre », alors que le vide obtenu à partir de pompes à diffusion est souillé

par les produits de décomposition des huiles.

L'Air Liquide s'est, bien entendu, intéressé aux cryopompes, puisqu'elles mettent en œuvre les basses et très basses températures.

3. - Cryopompes.

Les cryopompes sont basées sur le principe de la condensation d'un gaz sur une paroi froide.

A une température donnée, correspond un point d'équilibre sur la courbe de solidification du liquide ou sur la courbe de liquéfaction du gaz.

Un gaz sera incondensable si sa pression dans la cryopompe est inférieure à sa tension de vapeur à la température de la cryopompe. Par exemple, dans une cryopompe refroidie à l'hélium liquide, l'hélium et l'hydrogène sont incondensables. En effet, à 4,2 °K, la tension de vapeur de l'hélium est 1 atmosphère et celle de l'hydrogène est 10^{-7} torr, pression supérieure à celle réalisée dans une cryopompe.

L'intérêt du cryopompage réside d'une part, dans la propreté du procédé, d'autre part, dans la grande vitesse de pompage obtenue. Par exemple, une surface de cryopompe refroidie à l'hélium liquide et insérée directement dans une enceinte contenant de l'azote donne une vitesse de pompage de 11,6 litres par seconde et par centimètre carré. Cette vitesse dépend évidemment de la conductance interposée entre le gaz et la surface de la cryopompe. Si l'on interpose un baffle antirayonnement, la vitesse de pompage peut être réduite au cinquième et même au dixième de sa valeur nominale.

4. - Réalisations du C.E.C.

Une étude fondamentale du cryopompage est en cours. Elle a pour but principal la mesure du coefficient de capture d'une cryosurface refroidie à l'hélium liquide, pour différents gaz, introduits dans l'enceinte de la cryopompe, à différentes températures. La pression dans l'enceinte pendant les manipulations est de l'ordre de 10^{-11} torr. L'obtention d'une pression aussi basse nécessite un certain nombre de précautions concernant l'étanchéité des différents composants de l'enceinte et le dégazage préalable de ses parois.

Le coefficient de capture est défini comme le rapport du nombre de molécules captées par la paroi de la cryopompe au premier choc, au nombre de molécules incidentes, ce qui implique une étude approfondie de la géométrie du système.

La détermination du coefficient de capture, à partir des résultats d'expérience, a nécessité l'adaptation, à la géométrie de notre appareil, de la méthode de calcul statistique de Monte-Carlo.

D'autre part, nous avons construit et nous étudions actuellement une maquette de cryopompe industrielle de petites dimensions. Sa vitesse de pompage mesurée, qui est en accord avec les prévisions, est de l'ordre de 1 200 litres-seconde⁻¹ pour des pressions s'étendant de 10^{-3} torr à 10^{-9} torr.

5. - Avenir du cryopompage.

Le cryopompage a été l'un des moyens utilisés pour la reproduction de l'ambiance spatiale dans les grandes chambres de simulation spatiale ; il a également été utilisé dans certaines souffleries à basse densité.

L'emploi d'une cryopompe est justifié dans toute manipulation exigeant des vides à la fois très poussés et très propres, avec une grande vitesse de pompage.

Dans le domaine industriel, le cryopompage peut rendre d'importants services dans la métallurgie sous vide, pour l'élimination très rapide des gaz et le maintien de basses pressions. Il peut être utilisé également dans l'industrie chimique (élimination d'un ou plusieurs gaz dans un mélange de gaz à basse pression), dans l'industrie électrique ou électronique (élaboration de couches minces pour l'optique et l'électronique, traitement sous vide de semi-conducteurs, élaboration de matériaux supraconducteurs) et dans l'industrie alimentaire (lyophilisation).

Nous avons de bonnes raisons d'espérer que le cryopompage, comme bien d'autres techniques, devienne un jour une technique d'emploi industriel courant, après avoir été mis au point pour des emplois scientifiques ou techniques de pointe.

CONCLUSION

Au terme de cet exposé sur la cryogénie, j'espère n'avoir été ni trop vague, pour les initiés, ni trop ardu, pour les non-spécialistes. En évoquant devant vous les applications générales de la cryogénie, j'ai voulu vous montrer comment l'industrie et la science contem-

poraines tiraient un parti constamment grandissant des techniques cryogéniques. Il est raisonnable de penser que ces nouvelles techniques s'uniront aux techniques plus traditionnelles (par exemple dans le domaine de l'électrotechnique ou dans celui du transport

frigorifique des denrées périssables), chacune s'attribuant un domaine où elle se montre plus favorable, dans un développement harmonieux de notre civilisation industrielle en pleine expansion.

En vous développant quelques axes de recherches de notre Société dans le domaine des basses et des très basses températures, j'espère vous avoir montré que L'Air Liquide, né de découvertes scientifiques et techniques, entendait rester fidèle à sa vocation première, fondement de son développement et de sa prospérité depuis plus de soixante ans.

Je vous citais tout à l'heure l'opinion de Kapitza, suivant laquelle le développement industriel des découvertes scien-

tifiques était un « poème pédagogique ». Je sais bien aussi qu'un poète contemporain, Jean Cocteau, a écrit :

« Trouvez d'abord, cherchez après. »

Sans méconnaître le rôle premier de l'inspiration, dans laquelle les Anciens voyaient comme un commerce avec les Dieux, permettez-moi pourtant de préférer l'opinion d'un autre poète, moins à la mode peut-être, Emile Verhaeren :

Héros, savant, artiste, apôtre, aventurier
Chacun trouve à son tour le mur noir des
[mystères
Et grâce à ces labeurs groupés ou soli-
[taires
L'être nouveau se sent l'univers tout
[entier.

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

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

Prix et Médailles

attribués par la Société d'Encouragement pour l'année 1966

I. - Distinctions exceptionnelles

La Grande Médaille de la Société d'Encouragement est attribuée à M. Philippe LAMOUR, pour l'ensemble d'activités dont il est le promoteur, en sa qualité de Président - Directeur Général de la Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région du Bas-Rhône et du Languedoc, sur rapport de M. Demonque, au nom du Comité des Arts Economiques.

Le Grand Prix Lamy est attribué à la SOCIÉTÉ NATIONALE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS, pour avoir été un pionnier de l'électrification des lignes à grand trafic et, plus récemment, pour avoir réalisé la traction à fréquence industrielle, sur rapport de M. Jacques Debré, au nom du Comité des Arts Economiques.

La Grande Médaille des Activités d'Enseignement, au titre de 1966, est attribuée à M. Maurice FONTAINE, Membre de l'Institut, en hommage à la fécondité de son action de formation des chercheurs, sous la double forme de l'enseignement et de l'exemple personnel, sur rapport de M. Vayssière, au nom du Comité d'Agriculture.

La Grande Médaille des Activités d'Enseignement, au titre de 1967, est attribuée à M. Bertrand SCHWARTZ, pour l'œuvre qu'il a accomplie, aussi bien dans le domaine de la formation des ingénieurs que pour le développement de l'éducation permanente, sur rapport de M. André Grandpierre, au nom du Comité des Arts Economiques.

La Grande Médaille Michel Perret est attribuée à la Société ETNA, pour son rôle prééminent dans le marché mondial des applications industrielles de l'hydraulique, sur rapport de M. Brun, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

La Médaille Louis Pineau est attribuée à M. François EMMANUELLI, pour l'impulsion qu'il a donnée à la création de matériels français, en vue de la recherche et de l'exploitation pétrolières, sur rapport de M. Chaffiotte, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

La Médaille Oppenheim est attribuée à M. Maurice JULIEN, pour l'ensemble de sa carrière de chercheur et d'ingénieur, consacrée principalement à l'étude des suspensions et de la stabilité des véhicules automobiles, ainsi qu'à la lutte contre les vibrations, sur rapport de M. Picard, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

II. - Médailles d'Or

Une Médaille d'Or est attribuée à M. Georges AUBERT, pionnier de la pédologie, auteur de travaux fondamentaux sur les sols de France et d'Afrique, sur rapport de M. Hénin, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille d'Or est attribuée à M. René GANGNEUX, pour la part considérable qu'il a prise à de nombreuses réalisations de matières colorantes, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille d'Or est attribuée au journal « LE FIGARO », pour souligner, à l'occasion du centenaire de ce journal, l'importance des services qu'il a rendus et continue à rendre, notamment dans le domaine de l'information sur les grands problèmes économiques, sur rapport de M. Jacques Rueff, de l'Académie Française, au nom du Comité des Arts Economiques.

Une Médaille d'Or est attribuée au CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES, pour les résultats extrêmement remarquables obtenus, en peu de temps, par ce Centre et l'heureuse influence de son activité sur le progrès technique, dans un vaste secteur de l'industrie française, sur rapport de M. l'Ingénieur Général Raymond Marchal, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Une Médaille d'Or est attribuée à M. le Professeur BONINO, pour ses travaux scientifiques et pour sa longue carrière d'enseignement, sur rapport de M. Jean Lecomte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille d'Or est attribuée à M. Henri LACOMBE, pour son œuvre concernant, tant les phénomènes naturels de l'hydrographie marine que les problèmes techniques de mesure en mer, sur rapport de M. le Professeur Yves Le Grand, au nom du Comité des Arts Physiques.

III. - Médailles de Vermeil

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Henri ALIBERT, pour ses travaux intéressant les plantes industrielles tropicales, sur rapport de M. Vayssière, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Michel OLLAGNIER, pour son activité comme Directeur des stations expérimentales de l'Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux, sur rapport de M. Vayssière, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à MM. André VALLAUD et Robert DAMEL, auteurs d'un important ouvrage sur la prévention technique des accidents du travail et des maladies professionnelles, sur rapport de M. Dufraisse, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Gérard LORTHOIR, pour son étude sur l'évolution thermique de l'oxyde chromique CrO_3 , sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille de Vermeil est attribuée à M. Manuel LOPES da CUNHA BELO, pour ses travaux sur la corrosion, sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Jacques LEBBE, pour ses travaux dans le domaine de la pollution atmosphérique, sur rapport de M. Chovin, au nom du Comité des Arts Chimiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Fernand NOUVION, pour ses études sur la construction de locomotives directement alimentées en courant industriel, sur rapport de M. Jacques Debré, au nom du Comité des Arts Economiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. L. SIDERIADES, pour ses travaux sur l'étude topologique des systèmes hydrauliques et des systèmes électroniques et ses études sur la résonance non linéaire, sur rapport de M. Canac et de M. Lucas, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Roger MICHAUD, pour ses recherches, à l'aide des rayons X, sur les problèmes de structure des métaux et alliages, sur rapport de M. Canac, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Jean-Paul MARIOGE, pour l'étude et la réalisation d'une machine destinée à l'usinage des surfaces optiques asphériques de révolution, sur rapport de M. le Professeur Arnulf, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Siegfried KLEIN, pour son Ionophone, sur rapport de M. Lucas, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Jean DEMARCO, pour les remarquables améliorations qui lui sont dues, dans la réalisation des pièces d'optique, sur rapport de M. le Professeur Arnulf, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Louis CASTEX, pour la part très importante qu'il a prise aux recherches des Laboratoires d'Hydraulique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique et d'Hydraulique de Toulouse, sur rapport de M. Escande, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.
- Une Médaille de Vermeil* est attribuée à M. Gaston CHALMEL, pour la conception et la réalisation de nouveaux types de bogies, sur rapport de M. Raymond Brun, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

IV. - Médailles et Prix spéciaux

- Une Médaille Jollivet* est attribuée à la CHAMBRE D'AGRICULTURE DE L' AISNE, pour l'ensemble de son action et, tout particulièrement, pour la réalisation en cours de la carte des sols du département, sur rapport de M. Hénin, au nom du Comité d'Agriculture.
- Une Médaille Jollivet* est attribuée à la CHAMBRE D'AGRICULTURE DE L'ARDÈCHE, pour son action éducatrice, basée sur la détermination de divers niveaux de fertilité, dans un département au relief varié et aux conditions d'exploitation parfois difficiles, sur rapport de M. Hénin, au nom du Comité d'Agriculture.
- Le Prix Parmentier* est attribué à M. Jean JACQUET, pour ses travaux permettant d'importantes applications industrielles, notamment en ce qui concerne les produits laitiers, sur rapport de M. le Vétérinaire Général Guillot, au nom du Comité d'Agriculture.
- Le Prix Thénard* est attribué à M. Paul HUARD, animateur d'une Société de construction de matériel agricole qui manifeste une remarquable activité, sur rapport de M. Baratte, au nom du Comité d'Agriculture.

La Médaille Aimé Girard est attribuée à M. Léon DER KHATCHADOURIAN, non seulement pour l'œuvre qu'il a accomplie comme Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Grignon, mais aussi et surtout pour son activité dans l'amélioration de l'élevage en France, sur rapport de M. Baratte, au nom du Comité d'Agriculture.

Le Prix Osmond est attribué à M. Michel LACOUDE, pour ses travaux sur les transformations de la ferrite delta, sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille Fauler est attribuée à M. Laurent VILLA, pour son rôle comme Directeur de l'Ecole française de Tannerie de Lyon, ainsi que de différents organismes de recherche pour les industries du Cuir, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille Legrand est attribuée à M^{lle} Thérèse JULLIG, pour ses recherches concernant les détergents, sur rapport de M. Brocart, au nom du Comité des Arts Chimiques.

La Médaille Armengaud est attribuée au SERVICE DE STATISTIQUES DU COMITÉ PROFESSIONNEL DU PÉTROLE, pour les services qu'il rend à tout l'ensemble d'une grande industrie, sur rapport de M. Majorelle, au nom du Comité des Arts Economiques.

La Médaille Gilbert est attribuée à M. Jean-Paul DÉTRIE, pour son rôle, comme animateur du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, sur rapport de M. Majorelle, au nom du Comité des Arts Economiques.

La Médaille Farcot est attribuée à M. Edmond MENCARELLI, pour ses travaux portant, notamment, sur le perfectionnement et l'application des méthodes métallographiques non destructives, sur rapport de M. l'Ingénieur Général de Leiris, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

La Médaille Richard est attribuée à MM. Marc BASSIÈRE et Emile GAIGNEBET, auteurs d'un important traité de Métrologie générale, sur rapport de M. l'Ingénieur Général Nicolau, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

La Médaille Giffard est attribuée à la SOCIÉTÉ POUR L'ETUDE ET LA RÉALISATION D'ENGINS BALISTIQUES, pour la part très importante qui lui est due dans les succès remportés par la technique spatiale française, sur rapport de M. Chaffiotte, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

La Médaille Massion est attribuée à M. Albert SCHOLAERT, animateur d'une Société de construction de matériel textile, caractérisée par un souci constant de progrès technique, sur rapport de M. Pommier, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Le Prix Letort est attribué à la Société PROCÉDÉS TECHNIQUES DE CONSTRUCTION, pour les importants développements qu'elle n'a cessé d'apporter au procédé de vibro-fonçage, par lequel elle a révolutionné ce domaine de la technique, sur rapport de M. Pommier, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Le Prix Melsens est attribué à M. l'Ingénieur Général Louis-Charles BESSE, pour ses travaux de balistique, sur rapport de M. Trillat, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Le Prix Galitzine est attribué à M. Claude FAUQUIGNON, pour ses travaux sur les ondes de détonation et les ondes de choc, sur rapport de M. Boris Vodar, au nom du Comité des Arts Physiques.

La Médaille Gaumont est attribuée à M. Pierre POSSO, pour ses travaux concernant les techniques de la Photographie, de la Cinématographie et de la bande magnétique, sur rapport de M. Lucas, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

La Médaille Bourbon est attribuée à M. Haï VU, pour ses travaux sur les déformations plastiques des métaux sous pressions hydrostatiques et sur la spectroscopie infra-rouge sous hautes pressions, sur rapport de M. Maurice PONTE, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

V. - Médailles d'Argent

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Alain THUILLIER, pour ses travaux de chimie biologique, sur rapport de M. Le Moan, au nom du Comité d'Agriculture.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M^{me} Julienne BLOURI, pour ses travaux de mise au point de dosages particulièrement difficiles, sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Raymond FOULATIER, pour les services qu'il rend au Laboratoire de Chimie générale de la Faculté des Sciences de Paris, au titre de Physicien adjoint qualifié, sur rapport de M. Laffitte, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Auguste MAUBERT, pour les services qu'il rend au Laboratoire de Chimie générale de la Faculté des Sciences de Paris, comme Aide technique principal, sur rapport de M. Laffitte, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Pierre DEBROSSE, pour sa coopération technique à la réalisation des moteurs prototypes à la S.N.E.C.M.A., sur rapport de M. Chaffiotte, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Roger HUTINEL, pour sa compétence et sa faculté remarquable d'adaptation, tout au long d'une carrière consacrée à la mise au point des moteurs Hispano-Suiza, sur rapport de M. Chaffiotte, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Clovis GRANDCHAMP, pour son rôle dans l'enseignement technique et la formation professionnelle, sur rapport de M. Pomnier, au nom du Comité des Arts Mécaniques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Jean DESCHAMPS, pour un travail alliant les techniques de spectrométrie moléculaire avec les méthodes de mécanique quantique, sur rapport de M. Maurice PONTE, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Yves JULLIEN, pour ses études sur les vibrations, sur rapport de M. Canac, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Guy MORLOT, pour sa participation à de nombreuses recherches, dans l'infra-rouge lointain, sur rapport de M. Maurice PONTE, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. J. RAUCH, pour ses travaux sur l'insonorisation et le remplissage des moteurs, sur rapport de M. Lucas, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. Pierre SAUMAGNE — pour les travaux par lesquels, à l'aide de la spectrométrie infra-rouge, il a apporté une contribution

importante à la compréhension des actions inter-moléculaires dont la molécule d'eau est le siège — sur rapport de M. Maurice Ponte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille d'Argent est attribuée à M. René BERTRANDY, pour les nombreuses recherches qu'il a poursuivies, aussi bien dans le cadre de sa direction technique, au Laboratoire d'Essais de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Marseille qu'au cours de son enseignement à l'Institut Supérieur du Béton armé, sur rapport de M. Trillat, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

VI. - Médailles de Bronze

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Bernard RONDOT, pour la collaboration qu'il apporte au Service de Corrosion du Centre d'Etudes de Chimie Métallurgique de Vitry, sur rapport de M. Chaudron, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Chimiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Marcel ANDRAU, pour sa coopération en qualité de mécanicien, dans le domaine des Travaux pratiques et de l'organisation des laboratoires de recherche, à l'E.N.S.E.E.H.T. de Toulouse, sur rapport de M. Escande, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Jean-Marie GUERDON, pour les travaux qu'il a poursuivis, tout d'abord dans l'industrie privée comme mécanicien, puis comme Collaborateur technique du C.N.R.S., à la station de liquéfaction d'hydrogène et d'hélium de l'Ecole Supérieure de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris, sur rapport de M. Lucas, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Jean HIDOUX, pour les mérites professionnels qu'il a affirmés, dans ses fonctions de contrôle technique, aux Usines Renault, puis à la S.N.E.C.M.A., sur rapport de M. Boris Vodar, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Paul LUCET, pour son rôle, à la station d'essais à l'extérieur du Service d'Acoustique appliquée, dépendant du Centre de Recherches physiques de Marseille, sur rapport de M. Canac, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Bernard PELLISSIER, pour les services qu'il rend, en qualité de technicien, au Laboratoire des Rayons X du C.N.R.S., à Bellevue, sur rapport de M. Trillat, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Honoré POURCIEL, Chef d'Atelier de mesures, Collaborateur technique du C.N.R.S., sur rapport de M. Escande, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Jean RAINASSE, pour sa précieuse collaboration comme mécanicien du Laboratoire de Physique du Muséum, sur rapport de M. Yves Le Grand, au nom du Comité des Arts Physiques.

Une Médaille de Bronze est attribuée à M. Jocelyn VAGNER, devenu Ingénieur du C.N.A.M., après avoir mené de front des études et une activité professionnelle de mécanicien très apprécié, sur rapport de M. Jean Lecomte, Membre de l'Institut, au nom du Comité des Arts Physiques.

VII. - Distinctions décernées au titre social

Le Prix Fourcade est attribué à M. Jean CARRIÉ, présenté par les Etablissements Kuhlmann. M. Jean CARRIÉ compte 46 ans de service dans ces Etablissements.

Médailles des ouvriers et contremaîtres

Ancienneté

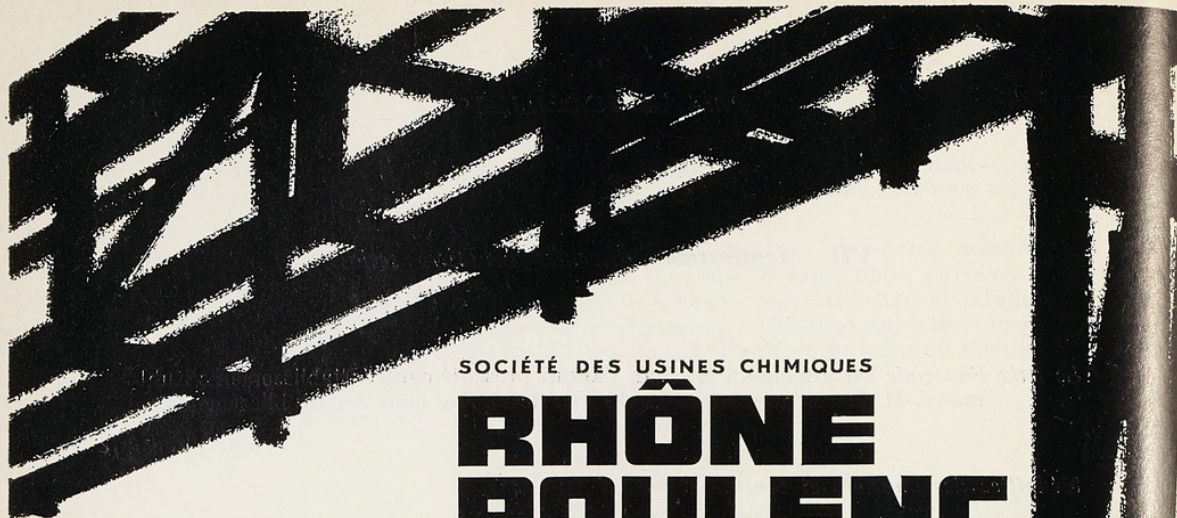
MM. A. COMMELIN, J. MOYON, A. RENAudeau, J. TERRIEN (Chantiers de l'Atlantique) ; M^{mes} J. CLANCHIER, A. MAROIS (J.-J. Carnaud et Forges de Basse-Indre) ; MM. N. PETIT (Desmarais Frères) ; F. CZERNIAK (La Loïsne) ; L. CAMARET, L. FROMENTIN, R. HARDOUIN, F. LAFARGE, A. MOLIN, A. PINQUIÉ, G. POUPIN, J. VERTUT (Régie Renault) ; A. LOUGARRE (Shell-Berre) ; E. DENÈVE, A. NONON, G. DESTRIEZ, F. LESAFFRE, M. SWYNGEDAUW, A. LE GLOANNEC, A. ROY, G. CAMAIN (S.N.C.F.) ; G. AIMONE (Péchiney) ; E. GAILLARD (Saint-Gobain) ; A. BARON, L. BARON, R. BUCHET, E. COURTECUISSÉ, C. DEMAÎTRE, S. DUFLLOT, M. LUIZ, J. MANNIER (Ugine-Kuhlmann) ; C. ARNOLD (Unelec).

Titre mixte

MM. M. HEITZ, G. LELORRAIN, A. BARCELLINI (Alsthom) ; P. DEUX, G. GABORIAU, L. MOYON, J. VAIRE (Chantiers de l'Atlantique) ; A. LARROZE, R. PONS, M. RICHEUX (Pétroles d'Aquitaine) ; J. PASTOR, R. GUILBAUD, A. DUPYTOU, J. HERBERT (J.-J. Carnaud et Forges de Basse-Indre) ; M. KREBS (Desmarais Frères) ; R. SORIN, M. TERRASSON (Dubigeon-Normandie) ; R. LECÈNE, A. FORNARI (Française de Raffinage) ; A. DELACOUR, A. SACRISTAIN (Hispano-Suiza) ; A. MAISONNEUVE, H. GOUTETOQUET (Laboratoire Central et Ecoles de l'Armement) ; S. DURZYNSKI (La Loïsne) ; R. FONTAINE (Pont-à-Mousson) ; E. BARITAUD, L. COURTOIS, G. COUTANT, J. LEROC'H, R. MERLE (Régie Renault) ; G. BEC, G. BESSE, L. DESBUARDS (Shell) ; R. ANNEN, J. LEFEBVRE, P. MAILLOFRET, J. ALBA, C. CARSAL, L. CHAY, R. GENGE, L. MARTIN, J. PETIT, R. SOUFFLET, L. PAITEL, A. PETIT, J. TIZON, X. ECARNOT, L. FELISAZ, J. PEYTHIER, R. BARIÈRE, M. SÉGALAT (S.N.C.F.) ; E. DAVID (Péchiney) ; A. LEROUX (Ugine-Kuhlmann) ; R. DUTRONCY, P. BOSSU (Saint-Gobain) ; A. TRACOL (Entreprise de Recherches et d'Activités pétrolières) ; M. PHILIPPE (Unelec).

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

I.F.Q.A.-CAHORS. — 70.646. — Dépôt légal : IV-1967



SOCIÉTÉ DES USINES CHIMIQUES

RHÔNE POULENC

- PRODUITS CHIMIQUES ORGANIQUES DE SYNTHÈSE
- PRODUITS MINÉRAUX PURS
- MATIÈRES PLASTIQUES

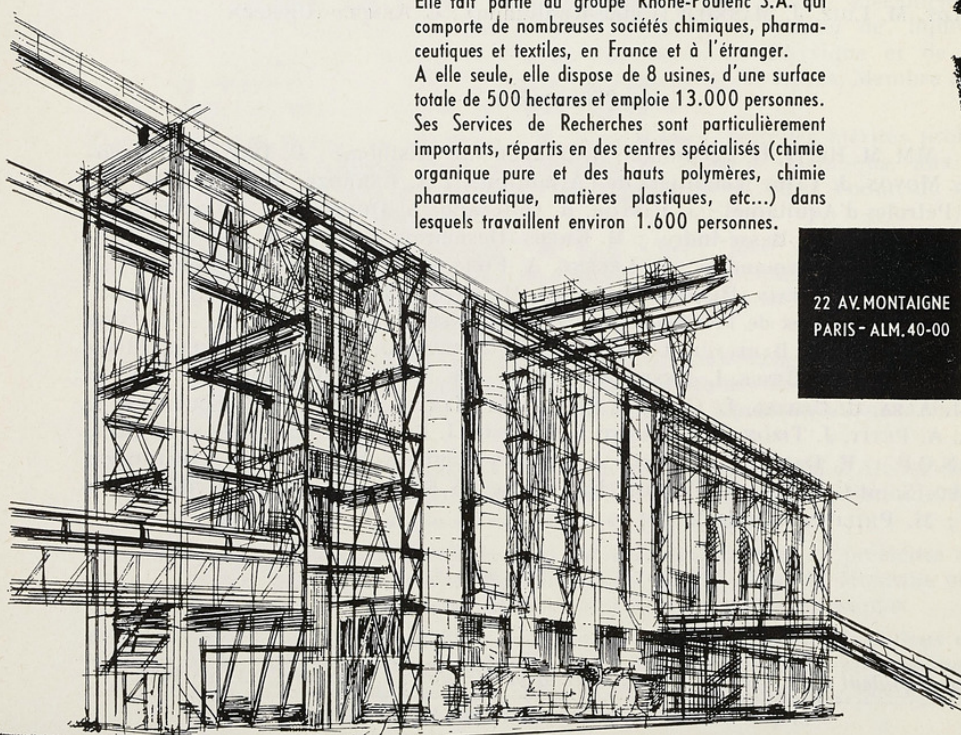


La Société des Usines Chimiques RHÔNE-POULENC fabrique environ 3.000 produits chimiques : produits organiques industriels, produits minéraux fins, produits pharmaceutiques, matières plastiques, etc...

Elle fait partie du groupe Rhône-Poulenc S.A. qui comporte de nombreuses sociétés chimiques, pharmaceutiques et textiles, en France et à l'étranger.

A elle seule, elle dispose de 8 usines, d'une surface totale de 500 hectares et emploie 13.000 personnes. Ses Services de Recherches sont particulièrement importants, répartis en des centres spécialisés (chimie organique pure et des hauts polymères, chimie pharmaceutique, matières plastiques, etc...) dans lesquels travaillent environ 1.600 personnes.

22 AV. MONTAIGNE
PARIS - ALM. 40-00



63 DIV. 10 019

CANEMAIN

SOCIÉTÉ D'ÉLECTRO-CHIMIE
D'ÉLECTRO - MÉTALLURGIE
et des
ACIÉRIES ÉLECTRIQUES D'UGINE

ACIERS
PRODUITS CHIMIQUES
ALUMINIUM
MAGNÉSIUM
FERRO-ALLIAGES
ÉTAIN

SIEGE SOCIAL : 10, RUE DU GENERAL-FOY - PARIS (8°)
TELEPHONE : EUROPE 31-00
ADRESSE TELEGRAPHIQUE : TROCHIM PARIS

MAISON FONDÉE EN 1895

“ LES ÉLECTRICIENS DE FRANCE ”

Ets JULES VERGER & DELPORTE

Société Anonyme, au Capital de 10.000.000 de F

ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES, ÉLECTRONIQUES ET TÉLÉPHONIQUES

Siège Social, Bureau d'Etudes, Service : 141 bis, 141 ter, rue Saussure, PARIS-17*
TEL. (1) 267-18-51 - 20 lignes groupées - TELEX. JULES 28482

Usine et Départements : Réparations — Bobinage — Radio — Télévision — Electronique — Automation
53, rue Maurice-Bokanowski, ASNIERES - Tél. 473 39-90, 62-28

Département : ELECTRO-VAPEUR - 92, avenue des Ternes, PARIS-17* - Tél. 380 42-70

Agence de VERSAILLES : 2, place Gambetta - Tél. 950-53-50 950-17-75 - Mag. 21, rue d'Anjou - Tél. 950-01-10
Agence de CANNES : 3, pas. Ste-Catherine - LE CANNET Tél. 39-58-71 Cannes (A.-M.)

MAGASIN DE VENTE : Radio — Télévision — Electro-Ménager — Froid :
92, Avenue des Ternes, PARIS-17* - Tél. 330 42-70
53, Rue Maurice Bokanowski, ASNIERES - Tél. 473- 39-90, 62-28.

EN AFRIQUE : SENEGAL - DAKAR

- SAINT-LOUIS

Côte-d'Ivoire

Dahomey

Mauritanie

Haute-Volta

Togo

- ABIDJAN

- COTONOU

- PORT-ETIENNE

- OUAGADOUGOU

- LOME

Bureaux-Magasins : 164, rue Blanchot - B. P. 968 - Tél. 227-26, 227-29.

Ateliers : Km 6,5, route de Rufisque, Hann - 451-39.

B. P. 101 - Tél. 51.

B. P. 4140 - Tél. 553-95.

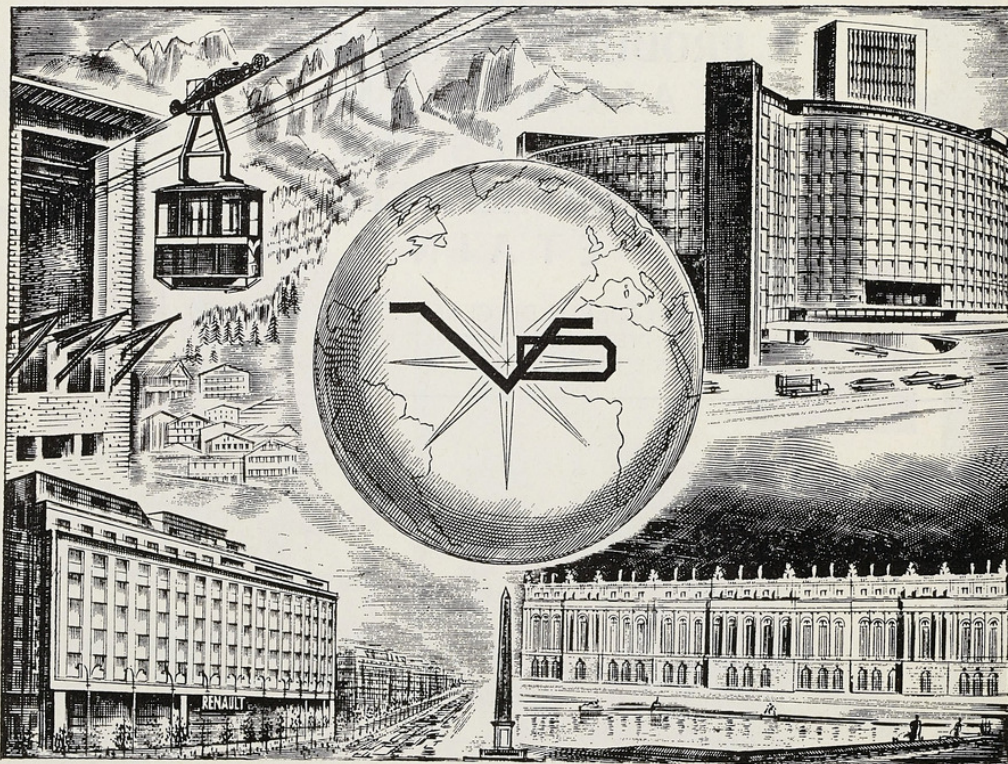
B. P. 184 - Tél. 27-76.

B. P. 68 - NOUAKCHOTT : B. P. 3 - Tél. 23-06.

B. P. 394 - Tél. 23-54 - BOBO DIOULASSO : B. P. - Tél. 26.

B. P. 1147.

VAL D'ISERE — Téléphérique. *quelques réalisations récentes* MAISON DE LA RADIO



RENAULT (Champs-Élysées)

PALAIS DE VERSAILLES

« LES ELECTRICIENS DE FRANCE » SONT JOUR ET NUIT
DIMANCHE ET FETES A LA DISPOSITION DE LEUR CLIENTELE



PEUGEOT

403.404

VOITURES DE QUALITÉ

R.P.F. 0,285.

VENTE A CRÉDIT PAR LA **Din**

L.P.F. 306

SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE LA GRANDE PAROISSE

AZOTE ET PRODUITS CHIMIQUES

Société Anonyme au capital de 19.595.800 F.

8, Rue Cognacq-Jay - PARIS-7^e - Tél INV. 44-30

AMMONIAQUE - ALCALI - ENGRAIS AZOTÉS

•

**ENGINEERING - CONSTRUCTIONS D'USINES
HYDROGÈNE**

GAZ DE VILLE - GAZ DE SYNTHÈSE

AMMONIAQUE

ACIDE NITRIQUE

ENGRAIS AZOTÉS

SOCIÉTÉ GÉNÉRALE D'ENTREPRISES

Société Anonyme au Capital de 36.160.000 F

56, rue du Faubourg Saint-Honoré - PARIS (8^e)

**ENTREPRISES GÉNÉRALES
TRAVAUX PUBLICS ET BATIMENT
ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE**

Barrages - Usines hydro-électriques et thermiques - Usines, ateliers
et bâtiments industriels - Travaux maritimes et fluviaux - Aéroports -
Ouvrages d'art - Routes - Chemins de fer - Cités ouvrières -
Edifices publics et particuliers - Assainissement des villes -
Adductions d'eau - Bureaux d'études

Grands postes de transformation
Centrales électriques
Lignes de transport de force

Électrification de voies ferrées
Électrifications rurales
Equipements électriques industriels

RÉSUMÉS DES ARTICLES

INTRODUCTION A LA GENETIQUE

par M. Henri Heslot, p. 3

L'auteur fait un bref historique de la science de l'hérédité, depuis les travaux de Mendel jusqu'aux recherches les plus récentes. Il mentionne le développement explosif de la génétique au cours des deux dernières décades et sa fusion de fait avec la biochimie.

La découverte du code génétique, la compréhension du mécanisme de la biosynthèse des protéines et de sa régulation représentent un remarquable enrichissement de nos connaissances sur la matière vivante.

D'autre part, la génétique a été à l'origine d'importantes applications pratiques, dans les domaines de la sélection animale et de l'amélioration des plantes.

GENETIQUE ET AMELIORATION DES PLANTES

par M. Robert Mayer, p. 9

Le développement des connaissances de génétique est très récent, alors que les travaux de sélection remontent à une époque très reculée.

Si les contraintes de l'amélioration des plantes : obligation d'utiliser un matériel d'étude encombrant, à reproduction lente, physiologiquement complexe, ne lui permettent de faire progresser la génétique que dans des cas particuliers, par contre, les progrès de cette dernière ont été très bénéfiques, en diminuant l'empirisme présidant aux travaux d'amélioration des plantes, en permettant la mise au point de méthodes de sélection rationnelles et efficaces, appliquées à des populations dont la variabilité génétique peut être augmentée, ce qui ouvre des perspectives de progrès insoupçonnées il y a vingt ou trente ans.

(Suite des résumés au verso)

EVOLUTION ET PROGRES DES POMPES LEUR ADAPTATION AUX APPLICATIONS RECENTES

par M. Paul Bergeron, p. 25

Dans une première partie est d'abord examinée l'évolution de la technique hydraulique des pompes, caractérisée :

- par l'augmentation des vitesses de rotation et des hauteurs par étage, grâce à l'augmentation de la capacité d'aspiration ;
- par l'amélioration des rendements, due plus particulièrement à la meilleure récupération de l'énergie cinétique à la sortie de la roue ;
- et enfin, par la connaissance plus approfondie des fonctionnements anormaux, situés en dehors de la zone des rendements maximaux.

La deuxième partie traite de l'adaptation des pompes, tout d'abord aux conditions actuelles — qui se caractérisent surtout par l'augmentation des débits et puissances, dans les différents domaines d'application — et ensuite de l'adaptation à la nature physique des produits pompés, en passant, en particulier, des liquides à très haute température à ceux à très basse température.

L'attention est attirée sur l'importance prise, dans ces différentes réalisations, par la nature des métaux utilisés et par le choix du type de garniture d'étanchéité à la sortie de l'arbre.

LA CRYOGENIE

par M. J.-T. Jenn, p. 49

La cryogénie, technique de production et d'utilisation des températures comprises entre -100°C et -273°C (le zéro absolu des Physiciens), a pris une importance de plus en plus grande au cours des dernières décennies, dans les domaines scientifiques et industriels les plus divers : production de matières premières, transport et stockage de gaz liquéfiés, aventure spatiale, etc.

La France, et plus particulièrement la Société L'Air Liquide, ont pris une part croissante dans l'effort de recherche et de développement, nécessaire pour aboutir à des réalisations industrielles dans tant de domaines nouveaux, énumérés rapidement dans l'article.

Une mention plus particulière est faite de deux applications spéciales, étudiées au Centre d'Etudes Cryogéniques de L'Air Liquide à Sassenage : la cryochirurgie et le cryopompage.

En conclusion, l'article indique toute la contribution que la recherche aux basses et très basses températures pourra apporter, dans les domaines les plus divers de la civilisation contemporaine