

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)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1963, n° 2 (avril-juin)
	1963, n° 3 (juil.-sept.)
	1963, n° 4 (oct.-déc.)
	1964, n° 1 (janv.-mars)
	1964, n° 2 (avril-juin)
	1964, n° 3 (juil.-sept.)
	1964, n° 4 (oct.-déc.)
	1965, n° 1 (janv.-mars)
	1965, n° 2 (avril-juin)
	1965, n° 3 (juil.-sept.)
	1965, n° 4 (oct.-déc.)
	1966, n° 1 (janv.-mars)
	1966, n° 2 (avril-juin)
	1966, n° 3 (juil.-sept.)
	1966, n° 4 (oct.-déc.)
	1967, n° 1 (janv.-mars)
	1967, n° 2 (avril-juin)
	1967, n° 3 (juil.-sept.)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	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	1963, n° 2 (avril-juin)
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1963

Collation	1 vol. (p. [101]-127) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	38
Cote	INDNAT (63)
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.63

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



PUBLIÉS AVEC LE CONCOURS
DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

1963

N° 2

Revue trimestrielle

N° 2 : AVRIL-JUIN 1963

SOMMAIRE ET RÉSUMÉS DES ARTICLES

DE LA PHYSIQUE A LA BIOLOGIE : **LÈS ACIDES NUCLÉIQUES**

par M. C. SADRON

p. 29

Au cours des récentes années les sciences biologiques et physicochimiques ont suivi des chemins inverses : les biologistes ont divisé la matière vivante en ses constituants ultimes : les macromolécules biologiques, pendant que les physicochimistes provoquaient la synthèse d'édifices de plus en plus compliqués : les macromolécules de synthèse. En même temps l'étude des propriétés électroniques des cristaux organiques a connu une extension considérable. L'ensemble de ces circonstances forme une conjoncture permettant de jeter des lueurs nouvelles sur les phénomènes biologiques fondamentaux. C'est ce qui est examiné ici au moins dans le cas des acides nucléiques.

LA MICROMINIATURISATION DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES

par M. Jean PEYSSOU

p. 45

Depuis un peu plus de dix ans, les progrès des techniques des armements sont conditionnés par l'efficacité de l'aide électronique : calcul, observation, radio-guidage, détection, enregistrement, recherche d'objectifs... La multiplicité des opérations à effectuer pour un seul engin a conduit à tasser le maximum d'équipement dans le minimum de place, par la « miniaturisation » des composants d'abord, puis par la « subminiaturisation », actuellement par la « microminiaturisation ».

Cette dernière technique est le fruit de l'imagination d'un très grand nombre de chercheurs et, en l'état actuel des choses, elle est en fait un ensemble de techniques très diverses, que l'on s'évertue à grouper en trois familles :

(Voir la suite en page 3 de la couverture)

Publication sous la direction de M. Jean LECOMTE, Membre de l'Institut, Président,
avec le concours du Secrétariat de la Société.

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

44, rue de Rennes, PARIS 6^e (LIT 55-61)

Le n° : 7,50 F.

C. C. P. Paris n° 618-48

DE LA BIOLOGIE A LA PHYSIQUE : LES ACIDES NUCLÉIQUES

par M. CHARLES SADRON,
Professeur au Museum National d'Histoire Naturelle,
Directeur du Centre de Recherches sur les Macromolécules.

I. — INTRODUCTION

Il est peu contestable que nous assistions, notamment depuis le début de ce demi-siècle, à un développement intensif des recherches en biologie et cela dans des directions telles que les aspects familiers de cette science se trouvent profondément modifiés.

Il apparaît en effet que, poursuivant l'analyse de plus en plus fine de la structure des êtres vivants, les biologistes en sont arrivés à reconnaître dans celle-ci des éléments ultimes organisés eux-mêmes à l'échelle moléculaire.

C'est à cette échelle qu'ils ont localisé les mécanismes élémentaires qui sont à la base même des phénomènes typiques de la vie au moins en ce qui concerne la cellule vivante ou, mieux encore, les êtres encore plus rudimentaires que sont les Phages ou encore — mais là nous sommes déjà à la frontière avec la matière inanimée — les virus.

Ces études ont atteint maintenant une telle ampleur qu'elles constituent une véritable branche de la biologie que l'on désigne tout naturellement sous le nom de biologie moléculaire.

S'il semble clair qu'une analyse ultime de la matière vivante aboutisse, comme dans le cas de toute matière, à la mise en évidence de molécules constitutives, il faut remarquer aussitôt que celles-ci apparaissent souvent sous l'aspect de molécules géantes, très caractéristiques, et constituées par un nombre énorme d'atomes pouvant aller presque jusqu'au million dans certains cas.

Ce sont ces macromolécules — tels les acides nucléiques et les protéines, pour ne parler que des plus typiques — qui sont les agents de ces réactions physico-chimiques infiniment nuancées dont le déroulement dans le temps et la répartition dans l'espace se composent dans un organisme pour lui conférer les caractères de la vie.

En fait, tout au moins sur notre planète et pour le temps présent, il n'existe aucun être vivant qui ne renferme acides nucléiques et protéines.

Ces macromolécules constituent soit à elles seules, soient associées à d'autres en une architecture délicate, de véritables petits organites aux multiples fonctions.

(1) Conférence faite le 3 mai 1962 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale (21^e Conférence Bardy).

Elles apparaissent ainsi comme une toute première étape de l'organisation de l'inanimé en vivant.

Il n'est donc pas étonnant, dans ces conditions, que ces édifices macromoléculaires qui, malgré leur complication, se trouvent néanmoins assez simples pour que leur étude ne décourage pas les physico-chimistes, aient suscité chez ceux-ci une intense et active curiosité.

Il est intéressant de constater, d'ailleurs, que les protéines — identifiées depuis bien longtemps — ont été reconnues comme des macromolécules à la suite des travaux de Svedberg, voilà près de trente ans, c'est-à-dire quelques années à peine après que Staudinger eût reconnu lui-même l'existence de macromolécules beaucoup plus simples — les hauts polymères par exemple — dans les produits de la synthèse chimique faite au laboratoire.

Ainsi, dans les années qui ont suivi les premiers travaux de ces pionniers, les physicochimistes ont-ils pu, en utilisant les édifices macromoléculaires simples préparés par le chimiste, bâtir les concepts et élaborer les techniques leur permettant d'aborder l'étude, combien plus complexe, des macromolécules biologiques.

Autant que l'on puisse fixer une ligne de départ, cette étape a commencé il n'y a guère qu'une dizaine d'années.

Mais plus récemment encore, une nouvelle évolution s'est manifestée. L'on sait en effet que, depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, un chapitre de la physique a connu un développement qui, bien que moins spectaculaire que celui des sciences du noyau de l'atome, s'est brusquement épanoui depuis les trois ou quatre années qui viennent de s'écouler. C'est celui des propriétés électroniques

de la matière et que l'on désigne couramment sous le nom de « Physique du Solide ». On sait toutes les remarquables réalisations techniques que cette science a permises, qu'il s'agisse des méthodes de conversion de l'énergie ou bien de stockage et de transmission de l'information.

Or, il est possible de transposer à la petite particule que constitue un édifice macromoléculaire — et mieux encore à un ensemble de celles-ci — les résultats obtenus en Physique du Solide. Aussi est-il en train de se créer sous nos yeux une nouvelle discipline — que l'on sera tenté d'appeler biophysique moléculaire — dont l'objet n'est plus seulement de déterminer les masses, formes et dimensions des macromolécules, mais encore d'étudier les propriétés électroniques de celles-ci et cela sous tous les aspects : électrique, magnétique et optique. Comme de plus, ainsi que l'on sait, les mécanismes électroniques sont les responsables des propriétés chimiques et physicochimiques de la matière, on voit tout de suite que la nouvelle étape à peine commencée, doit nous conduire directement au cœur de l'explication physicochimique des processus biologiques fondamentaux.

Il est difficile à l'heure présente de décrire, même approximativement, les perspectives qui s'ouvrent ainsi. Nous croyons cependant qu'elles sont tellement étendues que cette deuxième moitié de notre siècle en sera profondément marquée.

Ce sera justement notre propos d'illustrer les généralités qui précèdent en étudiant tout particulièrement le cas d'une catégorie de macromolécules des plus essentielles à la constitution de la matière vivante : la catégorie des acides nucléiques, ou, plus précisément des acides désoxyribonucléiques (ADN).

Nous devrions alors, pour être complets :

a) donner la composition de ces macromolécules, en décrire la structure interne, en définir la masse, la forme et les dimensions et enfin en caractériser les propriétés électroniques, donc les propriétés physiques et physicochimiques;

b) puis rendre compte, à partir de cet ensemble de données, des fonctions qu'elles assument au sein de l'être vivant : c'est l'explication physicochimique des phénomènes biologiques;

c) enfin d'indiquer si, et comment, à partir de ces connaissances, l'expérimentateur peut tenter de modifier à sa volonté les processus biologiques fondamentaux en agissant de façon calculée sur la structure de l'ADN.

Il est clair qu'un tel programme est trop ambitieux par son ampleur et conduirait sans doute à un exposé décevant compte tenu de l'état d'avancement des connaissances du moment.

Tel quel cependant, il mériterait, pensons-nous, une mise au point faite à loisir.

Mais une telle entreprise déborderait du cadre de cette conférence et sans doute aussi des limites de la compétence de l'auteur.

Nous restreindrons donc largement nos prétentions et nous nous attacherons surtout à tracer un bref et schématique bilan de nos connaissances sur les ADN en nous contentant — faute de mieux — de quelques allusions seulement à l'audacieux programme que nous avons ci-dessus défini.

II. — L'ADN : RAPPEL DES NOTIONS CLASSIQUES

a) DESCRIPTION DE LA STRUCTURE.

On sait depuis fort longtemps qu'il existe dans le noyau des cellules vivantes (MIESCHER, 1869), de même que dans les bactériophages et dans certains virus une substance chimique, l'acide désoxyribonucléique, constituée par une longue chaîne de mononucléotides. Chaque nucléotide est lui-même formé par un sucre, le désoxy-

pentose, portant en substitution l'une des quatre bases adénine, thymine, guanine, cytosine (fig. 1 et 2). Les nucléotides sont

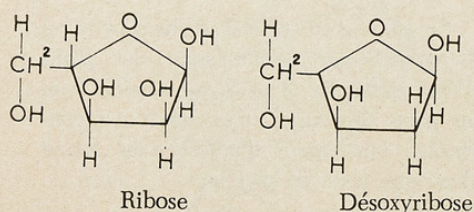


FIG. 1. — Les molécules de sucre (pentoses) engagées respectivement dans les macromolécules d'acide ribonucléique (ribose) et désoxyribonucléique (désoxyribose).

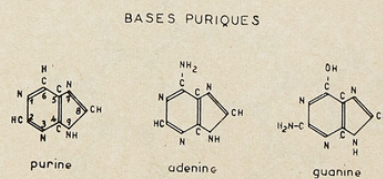
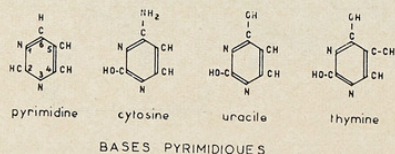


FIG. 2. — Les bases hétérocycliques engagées dans les acides nucléiques : adénine, thymine, cytosine, guanine pour l'ADN; adénine, uracile, cytosine, guanine pour l'ARN.

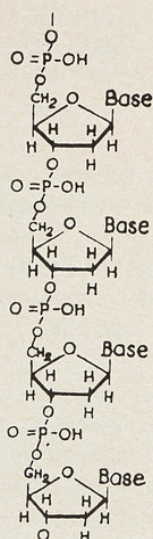


FIG. 3. — Structure d'un filament polynucléotidique.

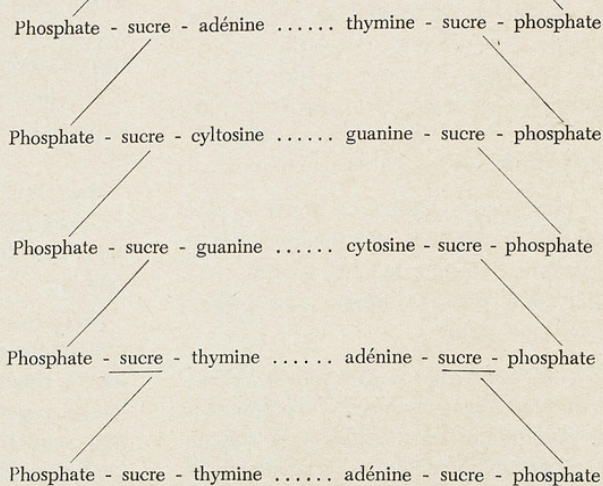


FIG. 4. — Schéma de l'appariement de deux filaments poly-nucléotidiques complémentaires.

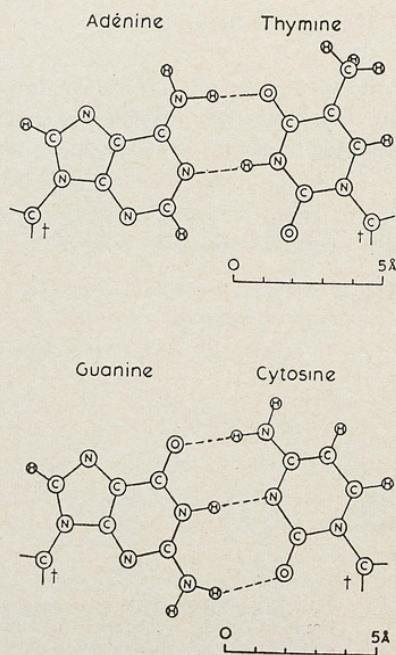


FIG. 5. — Schéma des ponts d'hydrogène établis entre bases complémentaires.

liés les uns aux autres en une longue file par des liaisons phosphodiester (fig. 3).

Mais il a été rapidement reconnu que, à l'état natif, les files de phosphodiester ne se trouvaient pas à l'état isolé, mais liées deux par deux.

En effet, entre A et T d'une part, C et G d'autre part, s'établissent des ponts d'hydrogène (fig. 4 et 5) de manière que les plans des bases appariées soient confondus. Une paire d'hétérocycles forme donc une sorte de plateau.

Tous ces plateaux se trouvent empilés les uns sur les autres avec un décalage régulier de telle sorte que les deux filaments de phosphodiester se trouvent à

présenter normalement la structure en double hélice, familière aux spécialistes depuis les travaux de WATSON et CRICK d'abord (1953), puis de WILKINS et de ses collaborateurs ensuite, qui ont étudié les fibres d'ADN aux rayons X et ont montré clairement que, à condition que les échantillons de DNA contiennent au moins 40 % d'eau, la double hélice a l'allure schématique suivante (fig. 6 et 7).

La double hélice est enroulée sur un cylindre de 20 Å de diamètre, la distance entre les deux plateaux basiques est de 3,4 Å. La masse molaire de cette particule est d'environ 20.400 pour 100 Å de longueur.

Des particules de telles dimensions peuvent être observées avec les procédés habituels de la microscopie électronique ainsi que le montrent les figures 7 et 8 correspondant à des procédés différents de préparation.

Remarquons que cette structure correspond à une proportion égale de A et de T d'une part, de G et de C d'autre part. Cela est en parfait accord avec les résultats de dosage sur tous les acides nucléiques connus, quelle que soit leur origine (mis à part un ADN isolé par SINSHEIMER dans un phage particulier, et qui ne présente pas, semble-t-il, la structure en double hélice). Par contre, le

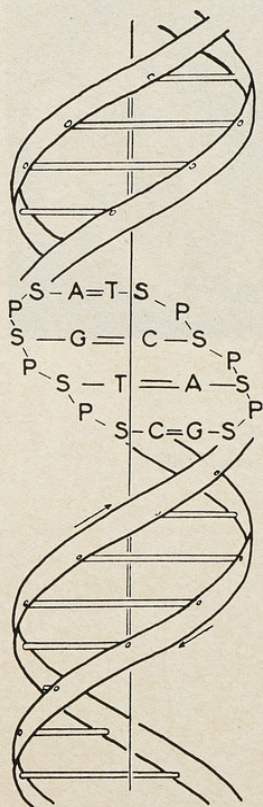


FIG. 6. — Schéma de la double hélice formée par deux filaments polynucéotidiques appariés (Crick et Watson).

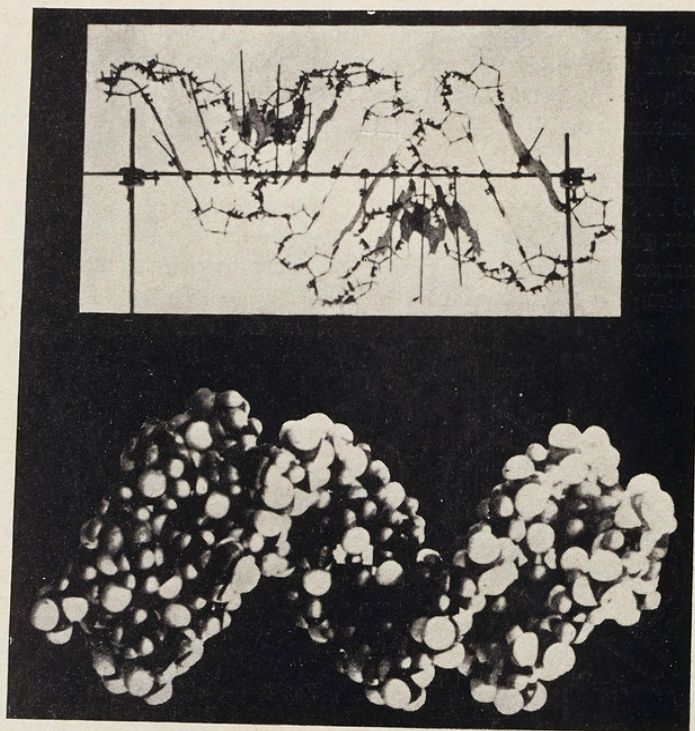


FIG. 7. — La double hélice : modèle détaillé



FIG. 8. — Photographie de filaments d'ADN au microscope électronique (ombrage à l'or).

rapport entre les masses A + T d'une part et G + C de l'autre dépend de l'origine du DNA et en particulier de l'espèce animale.

La conséquence de cette structure en longs filaments est que les échantillons de DNA ont l'aspect de fibres rappelant le coton. Dans ces fibres, les doubles hélices sont disposées parallèlement d'une façon assez régulière qui leur confère la propriété de donner des diagrammes de diffraction aux rayons X et sur l'analyse desquels nous n'insisterons pas ici.

Rappelons que l'acide ribonucléique (ARN) ressemble beaucoup à l'ADN. En fait, il en diffère en ce que le désoxyribose est remplacé par du ribose et la thymine par l'uracile.

De plus, les proportions entre adénine et uracile, d'une part, cytosine et guanine d'autre part ne sont pas strictement égales de telle sorte que la structure en double hélice de l'ARN n'apparaît pas avec autant de netteté que pour l'ADN.

b) LES FONCTIONS BIOLOGIQUES.

Progressivement, au cours des récentes années, le rôle joué par l'ADN au sein des organismes vivants s'est précisé et, en même temps que les observations et les résultats expérimentaux s'accumulaient, ce rôle est apparu comme de plus en plus fondamental.

On va en juger lorsque nous rappellerons d'un bref trait de plume les extraordinaires résultats auxquels la biologie moléculaire vient d'aboutir au cours de ces dernières années, résultats qui, du même coup, permettent d'espérer que commence une ère fructueuse pour l'interprétation physicochimique des mécanismes biologiques.

A. — L'ADN et les gènes.

On sait que l'ADN se trouve dans le noyau cellulaire, engagé avec des protéines, et que c'est cet édifice nucléoprotéique qui constitue l'essentiel des chromosomes, organites qui, comme chacun sait, sont les porteurs des caractères héréditaires de l'être vivant (fig. 9).



FIG. 9. — Filaments d'ADN au microscope électronique (Kleinschmidt, Lang, Zahn, *Naturwissenschaften*, 16 (1960), p. 1).

En fait, on s'est rapidement aperçu que les gènes — c'est-à-dire ces particules chimiques porteuses de l'hérédité et découvertes voilà près d'un demi-siècle par MORGAN — n'étaient autres que des particules ou des fragments de particules d'ADN.

Ainsi donc, les caractères morphologiques compliqués qui permettent de discerner les espèces et les individus seraient-ils gouvernés par la nature même des particules d'ADN.

Si l'on préfère, à chaque espèce, à chaque individu de l'espèce, devrait correspondre un équipement caractéristique en ADN. En somme, on pourrait imaginer un nouveau type de taxonomie en réduisant les classements habituels aux naturalistes à celui des collections de particules d'ADN.

Ainsi donc s'aperçoit-on de tout l'intérêt que présente cette description des assemblées de particules de DNA provenant d'un être vivant déterminé et ce sera là l'un des points sur lesquels nous reviendrons tout à l'heure.

B. — Mécanismes biologiques dont l'ADN est le support.

On sait que lorsqu'une cellule — disons plutôt une bactérie — se divise, la cellule fille est identique à la cellule mère. Donc son équipement en ADN est le même.

Au cours de la vie cellulaire, les particules d'ADN ont donc la propriété de se reproduire identiquement à elles-mêmes : elles subissent la replication. Les caractères de l'espèce se trouvent ainsi conservés.

Parfois, cette replication se fait avec une erreur : Les caractères génétiques sont modifiés. Il y a mutation.

On peut aussi faire intervenir des agents extérieurs chimiques (colorants, hydrocarbures polycycliques...) ou physiques (rayonnements de diverses longueurs d'onde) qui modifient en un ou plusieurs points la structure des particules d'ADN. On provoque alors une mutation qui, d'ailleurs, est le plus souvent létale.

On peut aussi substituer à l'ADN d'un individu de l'ADN provenant d'un autre individu de la même espèce mais portant des caractères génétiques légèrement diffé-

rents. Alors l'individu en expérience subit une mutation qui donne à sa descendance certains des caractères génétiques du donneur. A vrai dire, cette expérience n'a réussi jusqu'ici qu'avec les bactéries (pouvoir transformant). Pour les organismes supérieurs, les observations faites jusqu'à ce jour sont encore fortement controversées.

Apte à subir la replication, la particule d'ADN joue, de plus, un rôle essentiel : celui de maintenir identique à lui-même le stock des molécules de protéines qui, par milliers, habitent la cellule et en assurent le fonctionnement régulier.

C'est justement parce que — et c'est là (selon l'expression de CRICK) le « dogme central » de la biologie moléculaire — l'ADN gouverne la replication des protéines qu'il gouverne la nature même de la cellule et maintient l'identité de la cellule fille et de la cellule mère.

Ce contrôle de la synthèse protéique par l'ADN — hier encore à peine entrevu — vient d'être élucidé par les travaux très récents que les biologistes moléculaires mènent en ce moment avec une ardeur et un succès étonnants.

Contentons-nous ici de dire que les mécanismes proposés sont les suivants :

1. Sous l'influence d'un enzyme convenable, la double hélice se clive en deux filaments, chaque filament fixe les nucléosides triphosphates complémentaires, qui se soudent les uns aux autres comme par une fermeture éclair et ainsi le filament complémentaire est synthétisé : il forme avec le premier une double hélice. C'est l'autoreplication.

2. L'ADN sert de modèle de l'ARN. Un autre système enzymatique clive l'ADN et sur chaque filament viennent se fixer

les ribonucléotides complémentaires qui se soudent à leur tour pour donner un filament d'ARN. L'ordre des bases sur l'ARN est donc commandé par l'ordre des bases sur l'ADN. L'opération se fait selon un mécanisme intermédiaire compliqué et encore, dans une certaine mesure, hypothétique mais le résultat est celui que nous venons d'indiquer.

3. Par un mécanisme complexe — et à vrai dire pas encore connu avec pleine certitude lui non plus, et faisant intervenir des ARN intermédiaires (ARN de transfert) — les acides aminés viennent se fixer sur le filament d'ARN dans l'ordre dicté par les séquences de ce dernier et donnent ainsi une protéine spécifique.

En résumé : l'ordre des séquences A, T, G ou C dans l'ADN commande l'ordre des séquences A, U, G ou C dans l'ARN ce qui impose l'ordre de l'enchaînement des acides aminés qui forment la protéine dont la spécificité est ainsi fixée.

Ainsi, par l'intermédiaire de l'ARN, à un ordre de séquences dans le filament polynucléotidique correspond un ordre de séquences de restes aminés dans la protéine correspondante. On dit que l'ADN « code » la protéine. A l'heure actuelle, on pense qu'un acide aminé déterminé correspond à la succession de trois bases successives A, U, G ou C de l'ARN, soit les trois bases A, T, G ou C de l'ADN. On dit que le « rapport de code » est trois. On pense d'ailleurs que ce code est dégénéré et qu'il est universel pour toutes les espèces animales.

On exprime encore ces faits en disant que l'ADN contient une quantité d'information qui, par l'ARN et les protéines, est transmise à la cellule tout entière.

C. — *Les expériences in vitro.*

Certes, les mécanismes que nous venons de décrire concernent non plus des organes entiers de structure compliquée, mais seulement des groupes moléculaires relativement simples. Il n'en reste pas moins, cependant, qu'ils se déroulent au sein de la cellule en même temps que se déroulent des milliers d'autres réactions, qui forment un ensemble organisé dans l'espace et le temps.

On pouvait donc penser que les mécanismes dont l'ADN est le support ne peuvent avoir lieu effectivement que lorsque cette substance se trouve « intégrée » dans l'ensemble cellulaire vivant, et on peut se demander s'ils seraient bien observables hors de cet ensemble effroyablement complexe dont, en réalité, ils seraient la résultante.

Cette question est évidemment d'une importance fondamentale pour le physicochimiste : de la réponse qui y sera donnée dépendra l'intérêt biologique des travaux qu'il effectue sur l'ADN mis en expérience hors de la cellule vivante, au sein d'un milieu artificiel simple (solution chlorurée sodique ou tamponnée par exemple).

Or, le tout récent passé vient d'apporter un résultat dont l'importance est à mes yeux difficile à surestimer : *oui, les mécanismes fondamentaux peuvent être provoqués hors de la cellule, dans le tube à essai.*

C'est là ce qui apparaît d'une série (nous schématisons bien entendu) de quatre expériences : celle d'OCHOA et MANAGO (1957), celle de KORNBERG (1958), celle de HURWITZ (1960) et celle de NIRENBERG (1961).

Laissons de côté la première — malgré son intérêt extraordinairement grand — et résumons les trois autres qui entrent en plein dans notre propos.

KORNBERG : les désoxyribonucléosides triphosphate (précurseurs) en présence d'ADN natif servant comme modèle (primer) et d'un enzyme spécifique, se

HURWITZ : les ribonucléosides triphosphates (précurseurs) mis en présence d'ADN natif (primer) et d'un enzyme spécifique, s'enchaînent rapidement les uns au bout des autres pour donner un ARN dont la loi de séquence est imposée par celle de l'ADN primer. C'est la synthèse spécifiquement dirigée de l'ARN.

NIRENBERG : un ARN (primer) est mis en présence d'acides aminés et d'un enzyme spécifique : les acides aminés s'enchaînent l'un au bout de l'autre selon une loi de succession qui est imposée par la structure de l'ARN primer.

Ainsi le cycle est fermé et l'on a obtenu en tube à essai la synthèse des protéines spécifiquement dirigée par l'ADN et par l'intermédiaire de l'ARN selon le même cycle que l'on a mis en évidence *in vivo* et que nous avons décrit ci-dessus.

Certes, la présence du vivant n'est encore pas exclue de ce cycle de réactions : il a fallu introduire chaque fois un système enzymatique extrait des milieux biologiques appropriés et qui joue le rôle de Deus ex machina.

Mais cette fois, on se trouve devant un ensemble de réactions en nombre limité, indépendant du système intégral de réactions qui conduisent sans que l'on comprenne encore comment, à la pérennité de la matière vivante et ces réactions ne font intervenir que des systèmes moléculaires, ADN ou enzymes, dont il n'y a aucune raison de douter que leurs propriétés ne peuvent être expliquées en termes de physicochimie.

Bref, ces découvertes, qui, à mon avis, marquent une étape fondamentale dans l'histoire scientifique de ce siècle, font déboucher directement l'étude de ces mé-

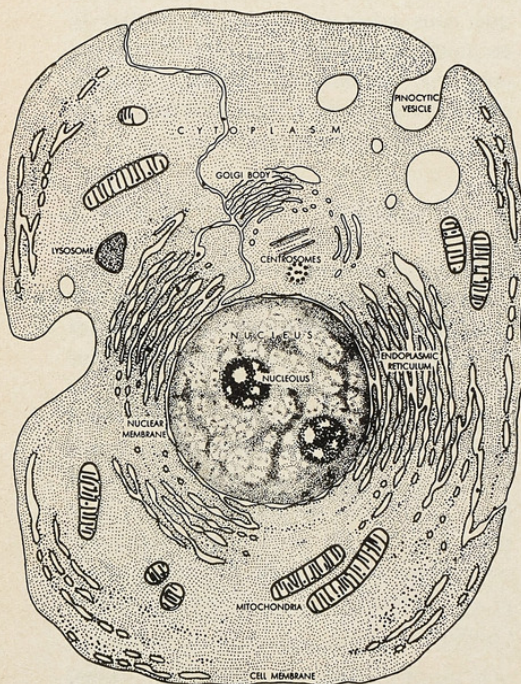


FIG. 10. — Schéma moderne de l'organisation cellulaire d'après Brachet (Scientific American, 205 (1961), p. 55).

fixent les uns au bout des autres rapidement dans le même ordre que pour le primer. C'est brutalement et totalement la replication de l'ADN *in vitro*.

canismes partiels et fondamentaux que sont l'autoreplication et la synthèse pro-

téique au sein de la matière vivante dans le courant de la physicochimie classique.

III. — L'ADN : QUELQUES PROBLEMES PHYSICHOCHIMIQUES.

Ainsi, les considérations qui précèdent nous amènent tout naturellement à préciser les deux premiers points du programme général que nous avons assignés à la biophysique moléculaire.

D'une part, nous devons rechercher une description exacte et détaillée des particules d'ADN avec l'espoir de discerner quelles différences de structure correspondent à telles différences de propriétés biologiques. Nous avons déjà posé comme un but idéal la caractérisation d'une espèce d'être vivant par la caractérisation physicochimique de l'équipement nucléique de ses cellules.

D'autre part, nous devons rechercher à expliquer les mécanismes fondamentaux qui, telle la replication, n'ont pas encore été observés ailleurs que dans la matière vivante. Nous venons de dire que les récentes découvertes *in vitro* levaient une barrière que beaucoup de bons esprits pouvaient jusqu'ici trouver décourageante.

Cependant, ces faits sont trop récents pour que nous puissions en mesurer encore des conséquences précises et c'est pourquoi je terminerai cet exposé déjà trop long par quelques considérations relatives aux problèmes fondamentaux posés par la recherche des propriétés physicochimiques de l'ADN *in vitro*, recherche

que nous pouvons maintenant poursuivre en toute tranquillité d'esprit puisque encore une fois nous savons que cet ADN, extrait de son milieu naturel, conserve son activité biologique caractéristique.

a) LES PROBLÈMES D'ANALYSE IMMÉDIATE.

Puisque finalement, le résultat des méthodes d'extraction mis au point par de nombreux travaux nous conduit à des échantillons d'ADN qui se présentent sous la forme de fibres que l'on peut disperser sans qu'elles semblent perdre leurs propriétés spécifiques en solutions macromoléculaires au sein d'un milieu aqueux de forme ionique et de pH convenable, il se pose d'emblée le problème général que connaissent bien tous les physicochimistes et en particulier les physicochimistes macromoléculaires.

D'abord, toutes les particules d'ADN dispersées dans le solvant sont-elles identiques ?

La réponse est non. Toutes ont bien la structure en double hélice de WATSON et CRICK et la composition en bases rappelée au début de cet exposé, mais le rapport $(A + T) / (G + C)$ semble différent d'une particule à l'autre. *A priori* en est-il de même pour la loi selon laquelle se succèdent les paires d'hétérocycles le long de

la colonne nucléique. Ainsi, dès l'abord, se heurte-t-on à l'une des premières difficultés fondamentales pour l'expérimentateur physicochimique : le milieu est un mélange... et on ne sait pas encore comment le fractionner en ses constituants, opération qui semble nécessaire à toute étude ultérieure.

— Mais au moins sait-on exactement quelle est la longueur — ou si l'on préfère la masse moléculaire des particules d'ADN en solution ? La réponse est encore non. En réalité, deux hypothèses extrêmes sont actuellement en opposition : selon la première, il existe dans le noyau cellulaire de très longs filaments en double hélice — peut-être un seul par chromosome — et qui se fragmentent au hasard au cours des agitations mécaniques nécessaires à l'extraction de la substance, donnant ainsi des tronçons dont la longueur n'a rien de significatif; la seconde selon laquelle existent des unités spécifiques, de masse et de longueur déterminées et qui se regrouperaient en amas irréguliers au cours des opérations d'extraction.

Les travaux qui sont depuis longtemps poursuivis au Centre de Recherches sur les Macromolécules, à Strasbourg, nous ont amenés à proposer qu'il existe bien des sous-unités constituées par de petits bâtonnets, ayant la structure de la double hélice de WATSON et CRICK, tous de longueurs très voisines ou égales à 3.000 Å environ, dont la masse molaire se trouverait ainsi voisine de 600.000. Enfin, dans la nucléoprotéine originelle, ces sous-unités seraient probablement articulées les unes au bout des autres par des joints de nature encore inconnue de façon à former un zig-zag repliable en accordéon, comportant environ 7 à 8 segments élémentaires (fig. 11) dont la masse totale serait ainsi de l'ordre de 5 à 6 millions.

Ces exemples montrent combien nous sommes peu avancés dans l'étude de l'équipement nucléique des êtres vivants et combien éloigné se trouve encore l'établissement de cette taxonomie nucléique dont nous avons déjà parlé si ambitieusement.

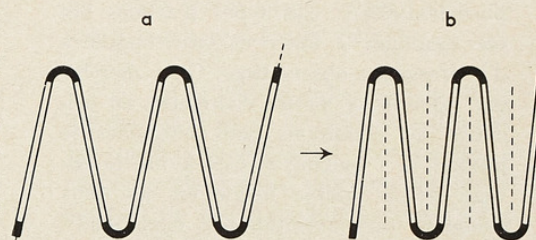


Fig. 11. — Un schéma possible de la configuration prise par un filament d'ADN.

b) LES PROPRIÉTÉS « FINES » DE L'ADN.

Néanmoins, il est d'ores et déjà possible — dans un premier temps — d'essayer de distinguer quelles sont les propriétés qui peuvent être communes aux diverses particules d'ADN, même si leur composition n'est pas la même. Ce qui est commun à toutes les variétés d'ADN, quelle que soit leur origine (à l'exception d'un échantillon très particulier extrait par SINSHEIMER du phage...), c'est que — ainsi que nous l'avons déjà décrit — cet ADN existe — à condition d'être en présence de suffisamment d'eau et d'une quantité suffisante d'halogénures alcalins — sous la forme de la double hélice de WATSON et CRICK.

On se trouve ainsi en présence d'un édifice constitué par un empilement de plateaux, chacun constitué par une paire d'hétérocycles.

L'un des premiers problèmes qui se pose donc est d'étudier la stabilité de cet édifice sous l'action d'agents extérieurs physiques ou chimiques. On voit que celui-ci peut être démoli de deux manières différentes : en rompant les liaisons d'hydrogène couplant les deux filaments nucléotidiques, ou en coupant les liaisons phosphodiester. Ces types d'actions ont été examinés à loisir et ont conduit à d'intéressantes observations. On a cherché, par exemple, à mettre clairement en évidence les conditions dans lesquelles se produit le « halving », c'est-à-dire le clivage de la double hélice en ses deux filaments polynucléotidiques composants, puisqu'un tel phénomène semble essentiel à l'existence des processus biologiques (replication, hybridation des caractères génétiques, etc.). Jusqu'ici — en dépit d'affirmations hâtives — aucun résultat probant n'a été obtenu. Ajoutons que, jusqu'à ce jour, on n'a pas isolé d'enzyme clivant la double hélice en ses filaments constituants.

Ensuite, on recherchera s'il n'existe pas des propriétés beaucoup plus subtiles, liées à la structure, et qui seraient les responsables du comportement si curieux de l'ADN soit *in vivo*, soit encore *in vitro* d'après ce que nous avons expliqué au paragraphe précédent. C'est là qu'entre en ligne de compte une nouvelle discipline qui vient de s'épanouir brillamment au cours des dernières années et que l'on désigne — peut-être de façon un peu vague — sous le nom de « physique du solide », et encore s'agira-t-il ici de la « physique du solide » organique. De ce point de vue en effet, la double hélice de WATSON et CRICK présente un intérêt puissant. Constituée, on l'a vu, par un empilement de plateaux formés chacun par une paire d'hétérocycles, formant des systèmes

conjugués, ces plateaux étant fortement couplés les uns avec les autres, cette double hélice se présente comme une sorte de bâtonnet moléculaire hérissé de groupes ionisables et entouré d'une couche d'eau probablement absorbée sur l'épaisseur de plusieurs anions moléculaires.

Il est évident qu'un tel « appareil », une telle « machine moléculaire », doit être le siège de phénomènes extraordinairement nuancés, dont il faut bien dire, l'étude commence à peine et sur lesquels, entre autres, le laboratoire de la Chaire de Biophysique du Museum commence néanmoins à recueillir des informations originales.

On peut prévoir tout d'abord que de telles particules peuvent prendre des états excités, différant entre eux par des énergies assez faibles pour qu'ils soient facilement provoqués, et dont la durée de vie est assez élevée pour que les propriétés chimiques correspondantes soient expérimentalement décelables.

On peut ensuite prévoir que le couplage serré qui existe entre les plateaux permette soit des transferts de charges tout le long de la double hélice, soit des transferts d'énergie. Ainsi une excitation locale, provoquée en un point défini du bâtonnet, peut-elle provoquer des réactions très délocalisées, ou même localisées en un tout autre point de la macromolécule. Nous pensons que c'est à un type de propriétés de ce genre que l'on doit rattacher certaines observations de génétique expérimentale touchant, en particulier, la perturbation générale du code tout le long du bâtonnet nucléaire provoqué par la fixation, en un seul de ces points, d'une macromolécule d'un mutagène telle par exemple une molécule de colorant (jaune d'acridine).

On peut ainsi prévoir que des interactions extrêmement intenses doivent exister entre les bâtonnets de DNA lorsqu'ils sont — comme c'est le cas dans la matière vivante — disposés parallèlement les uns aux autres de telle sorte que les doubles hélices sont pratiquement imbriquées les unes dans les autres avec, dans l'intervalle, un feutrage de protéine vraisemblablement semi-conductrice.

On peut, bien entendu, prévoir bien des choses et l'imagination des physico-chimistes va bon train.

Actuellement, un nombre considérable de travaux est accompli dans le domaine de la spectro-fluorescence, de la résonance paramagnétique électronique, de l'excitation en champ électrique de fréquences

diverses, de la thermogravimétrie et de l'analyse thermique différentielle.

Des résultats ont été annoncés : semi-conductibilité par les Anglais, antiferromagnétisme par les Russes, ferroélectricité par les Français. Il faut, devant cet ensemble, garder la tête froide, maintenir un esprit bienveillant certes, mais en même temps sévèrement critique.

C'est qu'en effet la richesse et la subtilité des réactions de l'ADN sont telles que des pièges innombrables sont tendus à l'expérimentateur qui doit non seulement disposer de l'aide de biochimistes avertis et de techniques très élaborées, mais encore appliquer sans faiblesse les rigueurs d'une méthode scientifique sans laquelle rien de valable ne sera fait.

IV. — CONCLUSIONS.

Ainsi donc, grâce à l'explosion des résultats de la biologie moléculaire, la physicochimie — qu'il s'agisse des techniques macromoléculaires ou des disciplines de la physique du solide — peut maintenant s'attaquer utilement — bien qu'encore avec difficulté — aux formidables problèmes posés par la matière vivante. Dans certains cas même, le développement des recherches de la biologie moléculaire nous amène, sans que nous ayons eu bien conscience d'un passage au travers d'une frontière, du domaine de la biologie à celui de la physicochimie.

Aucun doute que les découvertes que nous avons rappelées et qui montrent l'existence de la replication dans le tube à essai font que, dans ce domaine tout

au moins, l'opposition entre l'inanimé et le vivant semble s'atténuer jusqu'à disparaître.

Est-ce à dire que l'on doit, pour autant, admettre que tous les problèmes sont résolus ou sur le point de l'être ou plus exactement, que l'unité d'explication des propriétés de l'inanimé et du vivant est imminente ?

Evidemment non. Si la connaissance de certains mécanismes fondamentaux — telle que nous devons espérer raisonnablement la posséder prochainement — constitue un progrès considérable, il n'en reste pas moins pour l'instant, un problème redoutable et dans une certaine mesure déroutant pour l'esprit :

celui de savoir comment les rouages élémentaires dont chacun d'entre eux est — ou peut être — directement accessible à l'expérience du physicochimiste ont pu s'assembler en un nombre si extraordinairement élevé, selon un plan si considérablement compliqué et dans le temps et dans l'espace pour que le brin de matière s'organise en ce que nous appelons un être vivant.

Mais je pense néanmoins qu'aussi effroyablement éloignés que soient les triomphes dont nous nous enorgueillissons aujourd'hui du sommet de la connaissance où le vivant et l'inanimé se confondent dans une même science, nous ne devons éprouver aucun découragement. C'est qu'en effet, tout atome, toute parcelle de

connaissance arrachée à l'inconnu, même si le contenu de celui-ci n'en diminue pas pour autant, apporte à l'homme une puissance nouvelle sur le monde qui l'entoure.

Pour notre part, nous croyons que les connaissances que biologistes et physiciens conquerront de concert pèseront très lourd sur l'avenir du monde, autant et peut-être plus que la conquête de l'énergie nucléaire. Peut-être même pourrait-on penser que les biologistes et les physiciens en sont aujourd'hui où en était RUTHERFORD en 1919 quand il observa la première transmutation provoquée...

Est-ce que cette profonde révolution qui s'annonce sera bénéfique à l'homme ? Cela est une autre histoire.

LA MICROMINIATURISATION DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES ⁽¹⁾

Par M. Jean PEYSSOU
*Agrégé de l'Université,
Ingénieur à la Compagnie Générale de T.S.F.
Directeur du Centre de Dijon*

C'est au cours de la deuxième guerre mondiale que les belligérants, poussés par la nécessité d'équiper les sections d'infanterie de postes émetteurs-récepteurs portatifs, eurent à créer les premiers équipements électroniques du type « compact ». A cette occasion un certain nombre de solutions dites « miniatures » furent employées : tubes à vide, condensateurs céramiques, etc... Plus tard, la guerre de Corée, puis les affaires d'Indochine et d'Algérie, obligèrent les Etats occidentaux à développer considérablement cette méthode de construction, à la perfectionner par l'emploi des transistors, des circuits imprimés et des composants électroniques multiples. C'était l'époque de la « subminiaturisation ». Enfin, dès 1958, le développement des engins radioguidés, l'apparition des satellites, puis la reprise la reprise de la guerre froide, incitèrent les Etats à favoriser la recherche de matériels encore plus petits, plus légers et plus compacts : c'était le début de la « microminiaturisation ».

Essentiellement donc, la réduction de la dimension des équipements est, avant tout, une nécessité purement *militaire*. Effectivement, très peu de matériel civil éprouve pour l'instant la nécessité d'être « subminiaturisé », à plus forte raison « microminiaturisé ». Le plus populaire de ces matériels est le récepteur portatif transistorisé. Il semble qu'à l'heure actuelle, ce récepteur ne serait pas davantage apprécié, s'il était réduit à la dimension d'une gomme à effacer.

Seuls, aujourd'hui, les appareils de prothèse auditive, (amplificateurs pour sourds), semblent susceptibles de pouvoir être exécutés dans cette technique, avec une chance de réussite économique. Quoi qu'il en soit, afin de matérialiser cette évolution, voici à peu près à quoi correspond le volume occupé par une fonction simple, disons par exemple, par amplificateur de tension, selon les divers modes de réalisation.

I

LES TECHNIQUES DE LA MICROMINIATURISATION (2)

Avant guerre, ce type d'amplificateur dit « conventionnel » occupait environ 150 cm³. Le même, « miniaturisé » occupait vers 1948 : 80 cm³. A gain identique, la transistorisation, les circuits imprimés et l'emploi de composants multiples don-

nent une version « subminiature » de 8 à 10 cm³. En microminiaturisation, plusieurs étages sont nécessaires et occupent en tout deux à trois cm³, soit 50 à 100 fois moins qu'en 1940.

(1) Conférence faite le 31 janvier 1963 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

(2) Pour de plus amples renseignements sur les procédés utilisés et sur les caractéristiques des pièces obtenues, le lecteur est prié de consulter l'« ONDE ÉLECTRIQUE », n° 428, de novembre 1962, entièrement consacrée à la microminiaturisation.

Une autre façon de présenter les choses est de représenter le nombre de composants que l'on peut loger dans un volume donné de matériel, par exemple dans un dm^3 .

Dans ce volume, on peut loger, en fonctionnement réel assuré :

- de 80 à 200 composants « conventionnels » ;
- de 200 à 400 composants « miniatures » ;
- de 400 à 600 composants « subminiatures », avec tubes à vide ;
- de 800 à 1.500 composants « miniatures avec transistorisation » ;
- de 2.000 à 2.500 composants subminiatures avec transistorisation, et théoriquement, pour la microminiaturisation ;
- 25.000 composants du type « micromodules » ;
- 50.000 composants du type « microcircuits évaporés » ;
- 500.000 à 1.000.000 du type « circuits intégrés ».

Pratiquement, de nombreux problèmes de connexions ne sont pas encore résolus. En outre, la longueur d'onde des ondes sonores n'est pas « miniaturisable », et de nombreux composants sont encore relativement énormes (haut parleurs, piles, etc...).

Les trois derniers chiffres cités plus haut ne doivent donc être considérés qu'avec beaucoup de circonspection, et un facteur de correction de 1/2 à 1/10 selon les cas est une image plus correcte de la vérité ; mais il n'empêche que 100.000 composants par dm^3 est tout de même un nombre impressionnant.

Actuellement, une centaine de Laboratoires d'Etat ou de Compagnies privées travaillent sur ce sujet aux U.S.A. Environ quatre fois moins seulement en Europe, y compris l'Angleterre. Certains de ces travaux sont dirigés par les Administrations (Défense Nationale, Problèmes spatiaux, etc.), d'autres sont dus à l'initiative privée. Les solutions expérimentées sont évidemment nombreuses, tellement nombreuses même qu'une commission

internationale a été créée dans l'unique souci de surveiller et de noter tout ce qui se fait dans ce domaine, en vue d'établir seulement une classification. Ce n'est qu'il y a un an que l'on a réussi à se mettre à peu près d'accord sur les trois familles techniques suivantes :

- La *microminiaturisation à « composants séparés »*. Les composants microminiatures sont fabriqués séparément, puis ils sont groupés en ensembles fonctionnels. La technique la plus représentative est celle des « micro-modules ».
- La fabrication des ensembles fonctionnels par *évaporation successive de couches conductrices, semi-conductrices, isolantes, etc...* sur un support rigide passif : c'est la technique des « *microcircuits évaporés* ».
- La fabrication directe des ensembles fonctionnels par évaporation, diffusion et dopping de couches sur un support semi-conducteur actif, (Silicium ou Germanium), selon la technique des « *circuits solides* » ou « *circuits intégrés* ».

a) *Technique des assemblages de composants séparés.*

Essentiellement, chaque composant est ici une réduction maxima des composants classiques, actifs ou passifs. On se donne seulement comme ligne de conduite que la forme générale et les dimensions de tous les composants sont les *mêmes*, afin d'en faciliter l'empilement et l'interconnexion.

Les méthodes diffèrent selon le type dimensionnel choisi.

Les premiers travaux ont débuté voici quatre ans ; quatre techniques seulement semblent être encore en compétition :

— Les composants sont du type « *cylindrique* » avec connexions axiales. On les groupe côte à côte, leurs connexions étant engagées dans les trous de deux circuits imprimés jouant le rôle d'entretoise. C'est la méthode dite du « fagot », méthode à trois dimensions. Pour une hauteur de composants de 10 mm, on at-

teint un tassement de 20 à 25 composants au cm^3 , ce qui, compte tenu de l'interconnexion des « blocs » entre eux, permet d'atteindre 1.000 composants par dm^3 d'ensemble en fonction. C'est l'ordre de grandeur des ensembles dits « subminiatures ». Cependant, les composants sont faciles à faire, faciles à refroidir et l'on a déjà réalisé par ce procédé d'énormes machines calculatrices. Ce n'est peut être pas encore de la microminiaturisation, mais cela a le mérite d'exister pour un prix de revient abordable.

— Les composants sont du type « cylindrique » sans connexion. Leurs faces supérieure et inférieure sont métallisées et soudables. Les cylindres élémentaires sont engagés dans des trous percés dans un support isolant épais, de manière que les faces des composants affleurent aux faces du support déjà munies de connexions imprimées. On soude enfin les faces des composants aux métallisations imprimées. C'est la technique dite du « fromage de gruyère », (swiss cheese) nom tiré de l'aspect du support isolant alvéolé.

Les dimensions élémentaires de chaque cylindre sont, dans le cas minimum : $\varnothing = 1,25 \text{ mm}$, hauteur = $0,8 \text{ mm}$.

Les supports ont quelques centimètres carrés de surface : c'est une structure bidimensionnelle. L'équipement complet est réalisé par empilement des supports, puis liaison entre eux par une cage de conducteurs. Cette méthode est un net progrès par rapport à la précédente. Toutefois, les pièces détachées élémentaires ne sont plus tellement « classiques » et chacune nécessite, en fait, une étude nouvelle (condensateurs céramiques à disques empilés, résistances à couches à faible surface développée avec un effet de « connexions » considérable, etc...).

— Les composants (diodes, transistors, résistances) sont réalisés par diffusion sur un tout petit bâtonnet de Silicium dopé en fonction du composant à fabriquer (voir plus loin les procédés appelés « circuits intégrés »); les dimensions sont de l'ordre de $0,5 \times 0,5 \times 2,5 \text{ mm}$. Les capacités sont réalisées par des diodes montées

en inverse. Chaque pièce est munie de deux connexions, puis l'ensemble est câblé sur les connexions d'une embase de transistor, type T 05, puis encapsulé avec soudure électrique. Ce procédé est appelé procédé des « circuits solides en morceaux » (Réf. bibl. n° 1).

— Les composants sont de forme plate: plus exactement, le support des composants est une feuille de céramique sur laquelle est exécuté ou déposé le composant: résistances obtenues par évaporation sous vide d'alliages résistifs, self-inductance en forme de tore de ferrite bobinée, condensateur électrolytique au tantale sec soudé sur une face du support épais spécial ou encapsulé dans un minuscule boîtier métallique. Si la céramique du support est une céramique diélectrique, on la métallise elle-même sur ses deux faces et cela donne très simplement un condensateur.

Plusieurs formes ont été préconisées :

— Un disque circulaire à dix-neuf encoches argentées sur le pourtour, représentant 12 positions de connexions possibles. Diamètre = $0,45 \text{ inch}$, soit $11,5 \text{ mm}$ environ. Les promoteurs de ce système le considèrent comme avantageux, car, après avoir disposé côte à côte les disques, ou les blocs de disques empilés, les espaces libres entre les disques servent à loger les composants non encore microminiaturisés.

— Un hexagone à six connexions (sommet abattu). En contradiction formelle avec le précédent, le promoteur de cette formule prétend que l'empilement côte à côte des blocs d'hexagones est le plus compact possible, sans vide entre les blocs, donc le plus avantageux.

— Un carré à douze encoches pour connexions, à raison de trois encoches par côté du carré, de $0,310 \text{ inch}$ de côté, soit presque 8 mm de côté. Cette formule est l'héritière directe d'un ancien système de composants réalisés sur des plaques de céramique de 25 mm de côté, puis empilés, réunis à un tube à vide par une cage de conducteurs (procédé TINKERTON). Ce procédé microminiaturisé porte le nom de « micromodule type R.C.A. » du nom du

maître d'œuvre américain qui, sous l'égide du SIGNAL CORPS, a centralisé les études, et exécute les premières réalisations.

De tous les procédés déjà décrits, le procédé R.C.A., après quatre années de travail, arrive nettement en tête. C'est, à l'heure actuelle, le procédé qui a donné lieu aux réalisations les plus substantielles et les plus prometteuses (Réf. bibl. n° 2).

Quelle que soit d'ailleurs la forme de la plaquette élémentaire, les divers supports constituant les éléments passifs ou actifs d'une fonction électronique, sont empilés les uns au-dessus des autres ; puis les conducteurs sont soudés dans les encoches d'un même empilement, en forme de cage à douze barreaux. Ces fils dépassent à une extrémité. Ils sont parfois maintenus par les plaquettes, particulièrement solides, appelées « entretoises d'extrémité ». Enfin, après un contrôle électronique sommaire, le tout est enrobé d'une résine époxy qui le protège de l'humidité et lui confère la robustesse d'un bloc à peu près cubique de 1 cm³. Les connexions qui émergent d'une face du bloc jouent le rôle de fiches. Enfin, un équipement complet est constitué par le groupement, sur un circuit imprimé (carte à enficher) des blocs fonctionnels élémentaires.

Tout récemment, a été proposé un système dans lequel les modules carrés seraient montés à plat, côte à côte, les connexions entre eux se faisant par les angles (coupés) soudés à des broches directement serties dans un support isolant de circuit imprimé. On réalise ainsi l'équipement par « couches » superposées, au lieu de le faire par « blocs » adjacents, ce qui a l'avantage de permettre, grâce à des connexions très courtes, un fonctionnement satisfaisant en V.H.F.

b) Les « microcircuits évaporés ».

Ici on évapore sous vide, sur un support rigide isolant, des couches successives de métaux ou de diélectriques délimités en surface par des caches convénables. On réalise ainsi des conducteurs, des résistances, des capacités, etc... dont l'ensemble constituera un circuit passif.

— Le support est généralement du verre à surface parfaitement glacée, chimiquement et électriquement inerte, du type borosilicate ou cristal par exemple ; les verres riches en sodium ne peuvent être utilisés, car l'ion Sodium, de grande mobilité, rend ce verre trop conducteur, particulièrement en milieu humide. Les surfaces préconisées sont de l'ordre de 1 à 4 cm². Ce support est parfaitement nettoyé, physiquement et chimiquement, puis placé dans une cloche à vide.

— Les conducteurs sont obtenus par évaporation d'Aluminium, d'Or, de Cuivre, de Nickel, etc... en couche de quelques milliers d'Angströms, mais il semble que, dans tous les cas, il soit nécessaire d'évaporer d'abord une très mince couche de chrome qui assure une bonne liaison entre le métal conducteur et le verre (épaisseur 500 Å).

— Les couches résistantes sont obtenues par évaporation d'alliages Nickel-Chrome ou Or-Platine. On obtient ainsi des résistances de 200 à 300 ohms², pour des épaisseurs de couches de 150 Å et une dissipation de puissance maxima d'environ 1/10 watt à 1 watt par cm².

Les couches diélectriques, pour condensateurs de faible capacité, sont obtenues par évaporation de monoxyde de Silicium, ou de Silice (1 micron au moins) qui permettent d'obtenir de 200 à 500 pF/cm² pour 10 volts/service. Pour les capacités très élevées, on évapore du Tantale, ou du Titane, que l'on oxyde ensuite en oxyde de Tantale ou en oxyde de Titane, soit à chaud dans l'oxygène, soit par oxydation anodique selon le procédé de fabrication des condensateurs électrolytiques.

On a essayé de réaliser des self-inductances au moyen d'une spirale plate de métal conducteur. C'est ainsi que 50 spires, occupant un carré de 1 cm de côté, donnent une self d'environ 10 µH. Il n'y a pas de possibilités de blindage efficace.

Les composants actifs (transistors et diodes) sont, comme pour les « micromodules », des éléments encapsulés dans un microboîtier de métal avec deux ou trois

connexions émergeant de perles de verre. L'une au moins de ces connexions est en forme de ruban plat destiné à être soudé sur un conducteur évaporé et à fixer ainsi rigidement le composant sur le circuit évaporé.

L'interconnexion entre les divers micro-circuits s'exécute :

- soit par soudure d'une cage de conducteurs logés dans des encoches, comme pour le micromodule ;
- soit par encastrement de bossages de conducteurs du support dans des logements aménagés dans des isolants de circuits imprimés ;
- soit par enfichage du support dans les mâchoires d'un connecteur multiple, à la façon d'un circuit conventionnel sur carte à enficher.

De toutes façons, chaque circuit évaporé ou un montage de plusieurs de ces circuits, est protégé de l'humidité et de tout contact extérieur :

- soit par un enrobage de résine thermodurcissable,
- soit par le moyen d'un boîtier métallique étanche avec sorties par perles de verre.

c) *Les « circuits intégrés » ou « circuits solides ».*

Contrairement aux procédés déjà décrits où l'on réalise d'abord des composants électroniques passifs auxquels on ajoute ensuite les composés actifs déjà sous boîtiers, le procédé des « circuits intégrés » consiste essentiellement à réaliser d'abord un ou plusieurs éléments actifs sur une base convenable de Silicium ou de Germanium, puis à construire autour d'eux les éléments passifs (Réf. bibl. n° 3).

— Les éléments semi-conducteurs sont exécutés selon les procédés classiques de réalisation des diodes et transistors : dépôt en phase vapeur, croissance épitaxiale, diffusion en phase vapeur, etc... le tout à travers des masques adhérents aux parties à protéger. Ces masques, en métal,

en plastique soluble (photogravure), ou en Silice évaporée ou obtenue par oxydation du Silicium de la base, etc... sont évidés aux endroits convenables par des procédés mécaniques ou photochimiques, avec une précision meilleure que le micron.

— Les résistances sont généralement réalisées par le matériau semi-conducteur lui-même, convenablement dopé et façonné. Les zones résistives sont délimitées par des attaques photochimiques ou par des traits de scie. Eventuellement, on construit aussi des résistances par évaporation de métaux (Tantale), ou d'alliages convenables adaptés à la suite technologique des opérations, ou d'oxydes (SnO_2).

— Les capacités sont réalisées par évaporation de Silice ou par oxydation anodique de Tantale évaporé ou par utilisation de l'effet capacité des diodes à semi-conducteurs utilisées en inverse.

— Les conducteurs supplémentaires sont réalisés par des évaporations d'Or, d'Aluminium ou de Platine, etc...

— Mais la grande nouveauté du système, c'est que l'on utilise les propriétés mêmes de la matière, que ce soit le support ou les couches déposées, pour réaliser de nouvelles fonctions, à constantes réparties. Ces fonctions font intervenir les concentrations variables en éléments dopping, les formes des pièces (volumes et surfaces), les effets de champ, etc... la dissymétrie des propriétés des cristaux orientée par épitaxie, la passivation des surfaces, l'interaction des couches multiples superposées, la canalisation des courants par des fentes de profondeur bien définie (effet de champ), etc... Cependant, la réalisation des inductances et actuellement impossible et cela réduit d'une manière importante l'universalité du procédé.

— En revanche, l'on essaie d'utiliser à des fins électroniques des fonctions physiques disons « parallèles » telles que :

- Les effets magnétiques, les effets optiques, les effets de transports ioniques, l'influence du fonctionnement à très

basse température (air liquide, hélium liquide, supra-conductivité, etc...), l'effet photo-électrique, les effets thermiques, les phénomènes de résonance, etc...

Quand un ensemble fonctionnel est ainsi réalisé, on l'enferme dans un boîtier étanche de quelques mm³, avec sorties par microperles de verre (boîtier TO 5 à huit sorties).

Deux types de présentation sont actuellement préconisés :

- Les *structures plates* bâties autour d'une lame monocristalline de Germanium ou de Silicium ;
- et les *structures cylindriques* dont la base est un bâtonnet cylindrique de semi-conducteur dont les tranches ont des compositions et des structures variant selon la fonction à réaliser.

II

LES LIMITATIONS DE LA MICROMINIATURISATION

Il est certes très satisfaisant pour l'esprit de savoir que l'habileté des hommes jointe à leur imagination leur permet de construire des fonctions relativement complexes dans un volume extraordinairement réduit... encore faut-il pouvoir utiliser ces réalisations à l'échelle humaine et en balancer le prix face aux avantages.

Les limitations actuelles les plus évidentes sont :

- la puissance ;
- les moyens de liaison avec l'extérieur ;
- le prix.

a) Puissance de sortie :

La puissance de sortie est conditionnée par l'utilisation envisagée : produire un son contre une oreille nécessite 1/100 watt, moduler le pinceau électronique d'un oscillographe, d'un radar, ou d'un téléviseur, demande 0,5 watt, enregistrer une information et la restituer demande quelques milliwatts. Or, faire plus petit ne veut pas dire conserver forcément la même puissance, des lois évidentes s'y opposent.

Par exemple, réduisons un ensemble fonctionnel dans le rapport dimensionnel de 1/2, le volume est réduit à 1/8, ainsi que le poids. Mais la surface n'est réduite que de 1/4, ainsi que les possibilités de refroidissement grossièrement proportionnelles à la surface. La résistance des pièces aux chocs et aux vibrations augmente de huit fois, (masse plus petite), mais diminue de quatre fois (surface d'at-

tache plus petite) ; en définitive, gain de deux fois seulement. La tension applicable aux diélectriques et aux isolants doit être divisée par deux, les courants circulant dans les conducteurs sont divisés par quatre (section). La puissance utile est divisée par un facteur qui peut atteindre huit selon les formes... c'est-à-dire plutôt selon le nouveau seuil d'apparition des phénomènes non linéaires conséquences de surcharges locales.

La conclusion, c'est qu'une miniaturisation irréfléchie, disons *simplement géométrique*, est un désastre du point de vue puissance. Ceci amène donc les techniciens à trouver d'autres types d'architecture dont l'énoncé simple serait : « J'ai besoin de tant de puissance sortie, pour un volume maxima de tant ».

On peut illustrer ce problème par l'examen du comportement des *condensateurs*. Soit un condensateur à diélectrique classique faisant partie d'un ensemble où l'on choisit à priori un coefficient de réduction linéaire de 2. L'épaisseur du diélectrique est deux fois plus petite, la surface quatre fois plus petite, donc la capacité deux fois moindre, la tension deux fois moindre, la puissance 1/2 CV² huit fois moindre... Mais, compte tenu de l'enrobage, dont on conserve l'épaisseur pour des raisons de robustesse, le volume n'est en fait que quatre fois plus petit.

Le technicien n'est donc pas satisfait et va travailler dans les voies suivantes :

- a) Il va améliorer la *qualité* du diélec-

trique, puisqu'il peut être plus cher, tout au moins pendant la durée des études ; de ce fait, l'angle de pertes sera plus faible, le *champ électrique* de service plus élevé ; la *température de fonctionnement* sera aussi plus élevée, (passant de 85° à 125° C ou 150° C), la *dissipation* thermique sera plus forte par cm². On améliorera par ailleurs l'évacuation de la chaleur par une judicieuse mise en place des composants contre les boîtiers.

b) En outre, la capacité est imposée par des questions de circuit, et l'on construira donc des condensateurs *multicouches* afin de conserver la capacité. En conséquence, la puissance service sera à peine divisée par 2 au 3, grâce au fait que les matériaux employés seront de plus haute qualité.

On peut faire un raisonnement parallèle pour la plupart des autres pièces détachées passives, et ce raisonnement est d'autant plus fructueux que l'on se rapproche davantage de la technique des circuits *intégrés*. Dans ce cas, en effet, le contact entre les fonctions est tellement intime que le bloc est isotherme et la chaleur dissipée est une simple opération de refroidissement par la liaison du circuit au boîtier. Néanmoins les puissances diminuent et l'on joue en gros avec les puissances suivantes par ensemble fonctionnel :

- Systèmes à composants séparés : de 0,01 à 1 watt,
- Systèmes à composants évaporés : de 0,01 à 0,1 watt,
- Systèmes à circuits intégrés : de l'ordre du milliwatt.

Microminiaturiser à l'excès impose donc de créer une nouvelle conception de l'électronique : *l'électronique de la micropuissance*.

c) La deuxième limitation est celle des liaisons à l'extérieur.

- Les connexions sont évidemment le cas le plus spectaculaire de ces liaisons et l'on cite le cas de machines à calculer à circuits évaporés où le volume des écheveaux de connexions

est cent fois plus grand que le « cerveau » proprement dit.

On commence à prendre conscience de cet état de choses et des solutions sont en vue, en particulier par la construction de « *microcircuits imprimés* » *multicouches*, (24 couches de conducteurs)... et surtout par le développement des techniques de réalisation où les contacts entre composants se font sans connexions (plaquettes à composants multiples superposés, ou juxtaposés, etc...). Les ensembles *évaporés* ou *intégrés* nécessitent évidemment moins de connexions que les micromodules.

- L'autre cas de liaison défectueuse avec l'extérieur est celui des composants énormes (boutons de commande, potentiomètres, piles, hauts-parleurs, condensateurs variables, relais, etc...) et surtout la nécessité de commander tout cela par la main de l'homme avec ses gros doigts...

d) Enfin la troisième limitation est le prix, pour l'instant tout au moins. Il est un fait que, lorsqu'on diminue la taille d'un objet, le prix décroît avec la quantité de matière première, mais croît ensuite avec la difficulté de réalisation, c'est-à-dire avec la main-d'œuvre et le faible rendement de fabrication. Il existe donc un prix minimum fonction des circonstances. Dans le cas présent, le prix de la réalisation l'emporte de loin sur le prix de la matière, et il est incontestable que les ensembles microminiaturisés sont très coûteux.

Diminuer le prix, c'est donc une affaire d'organisation des industries face aux éléments suivants :

- Existence d'un *marché important*, homogène au maximum, par exemple : existence d'un marché de récepteurs portatifs à modulation de fréquence à raison d'un récepteur pour trois hommes pour toutes les forces armées terrestres ;

Ou bien, existence d'un besoin d'émetteurs météorologiques pour fusées de sondages atmosphériques ;

Ou bien appareillages de compresseurs

de bande dans le cas d'une téléphonie sur ligne à bande passante comprimée (25 Hz au lieu de 2.000 Hz), à raison d'un décompresseur par poste téléphonique.

— Installer une *fabrication de série* envisagée selon l'un des deux aspects suivants :

Ou bien l'on adopte un système à *composants séparés* et l'on construit avant tout des chaînes importantes de *composants*, avec seulement quelques ateliers de mon-

tage des ensembles : c'est un dispositif souple qui peut traiter des modèles très divers, même s'ils sont peu nombreux dans chaque modèle d'équipement ;

Ou bien, l'on impose un système à circuits *évaporés ou intégrés*, et la chaîne à monter est spécialisée ipso facto pour un *seul modèle* de circuit par chaîne, ce qui nécessite un marché très important par modèle au détriment de la souplesse et de la diversité.

III

LA COMPÉTITION ENTRE LES TROIS SYSTÈMES DE MICROMINIATURISATION

Il semblerait logique, économiquement parlant, que les États qui financent les études et que les entreprises privées qui participent individuellement à ces travaux choisissent un *seul procédé* de microminiaturisation, et consacrent à son développement l'ensemble des efforts actuellement divisés au moins entre trois écoles. En fait, le problème du choix d'une méthode unique est actuellement impossible car :

— On a pas encore assez d'expérience dans les techniques de réalisation pour évaluer la qualité des produits en rapport avec leurs prix.

— Il n'y a pas encore de « besoins » nettement caractérisés, dans le cadre de la qualité que l'on sait faire, pour être à même de fixer un cahier des charges objectif et de sélectionner ensuite les possibilités de répondre à ce cahier par telle ou telle voie préférentielle.

— Les trois voies d'exécution décrites plus haut ne sont pas en fait en compétition car elles ne traitent pas du même sujet :

— Le procédé par éléments séparés est susceptible de fournir des puissances élevées de l'ordre du 1/2 watt/cm². Il est d'emploi souple et quasi universel puisque tous les composants, même les selfs-inductances sont réalisables dans ce système. On peut ainsi réaliser n'importe

quel type d'équipement, analogique ou logique, en grande série comme à *exemplaire unique*. L'industrialisation consiste seulement à monter des chaînes de « composants » électriques d'emploi aussi universel et diversifié que les composants conventionnels. Les ateliers de montage des modules, puis des équipements, sont relativement peu importants, et tout industriel spécialisé en électronique pourra sans gros frais monter un tel atelier chez lui.

En outre, beaucoup de composants seront utilisables tels que dans les postes conventionnels ou simplement miniatures ou subminiatures, transistors, diodes, résistances, capacités, inductances et transformateurs, etc. Accroissant ainsi la demande, ce débouché supplémentaire contribuera à abaisser le prix de revient des chaînes de fabrication des composants.

— Au contraire, les procédés par évaporation sous vide et par circuits intégrés, moins universels, sont déjà réservés à la seule exécution des *circuits logiques*. De puissance de sortie réduite, leurs débouchés sont très spécialisés, donc forcément limités en nombre. Le bas prix de revient ne pourra être atteint que lors de l'exécution d'un très grand nombre d'équipements du même type, étant donnée la complexité des moyens d'exécution (éléments de calculatrices). Leur seule possi-

bilité d'universalité consisterait à réaliser un petit nombre de fonctions simples logiques, peut-être 30 à 50 *au maximum*, sur des supports type « procédé à éléments séparés ». De cette façon, l'ensemble fonctionnel évaporé ou intégré est utilisable au même titre qu'un composant unique, si la puissance de sortie le permet.

En somme, l'idéal serait donc une *hybridation des méthodes*, chacune apportant aux autres ce qu'elle a de plus simple, de plus sûr et de moins cher, étant données les circonstances du moment et les exigen-

ces des cahiers des charges. Il n'y a pas de rivalité, il y a complément entre les procédés et, de ce fait, beaucoup de souplesse dans les réalisations. Ceci bien sûr, implique pour l'instant que les études soient poursuivies et que des pilotes soient mis en route dans les trois directions. Bien plus, les techniciens ne doivent pas s'ignorer, mais être informés dans les plus amples détails de l'état d'avancement des travaux de leurs voisins. *Ils doivent s'entraider avec le plus grand désir de coopérer et non chercher à se détruire.*

IV

PHILOSOPHIE ET CONCLUSION

La microminiaturisation est-elle une *aventure* ?

Etant donnée l'ampleur du problème, on pourrait à première vue penser que, pour un petit pays européen, « aventure » serait le terme à employer. En fait, la portée de la microminiaturisation doit être considérée à l'échelle mondiale, ou tout au moins, dans le contexte politique du monde actuel, à l'échelle de la civilisation occidentale. Dans cette optique, la microminiaturisation n'est pas une aventure, c'est à la fois une *nécessité vitale* et une étape de la *marche inéluctable vers le progrès*.

On peut déplorer que la situation politique et militaire du monde soit ce qu'elle est, mais il n'empêche que, du point de vue égoïste occidental, *deux catastrophes* peuvent se produire auxquelles nous devons survivre, ou accepter de disparaître :

— La première éventualité est celle d'un conflit armé, avec mise en mouvement de techniques de *combat les plus modernes*. Il est évident qu'on ne survit à un tel conflit que si l'on dispose d'armes au moins égales sinon supérieures en nombre et en qualité à celles de l'adversaire du moment. Il est incontestable que les armées modernes sont à base d'électronique, tout au moins pour les opérations stratégiques. Projectiles, fusées et engins, calculateurs, radioguidage, postes de surveillance terrestres, aériens, maritimes,

télécommunications, etc. sont justiciables de la microminiaturisation qui, seule, permet un allègement considérable des matériels donc, pour un poids donné, une efficacité supérieure du matériel.

— La deuxième éventualité est représentée par l'invasion armée de l'Occident par une masse d'hommes plusieurs fois supérieure en nombre, mais d'un armement plus rustique parce que trop nombreux : la seule défense possible est l'organisation à l'avance de la défense souterraine. Etre seul au milieu de 10 ennemis, ce n'est rien si vous, vous « savez », et si les 10 ennemis « ne savent pas ». Pour « savoir », chaque combattant souterrain devra être muni de son micro-récepteur, facile à dissimuler, et d'un service inébranlable quelles que soient les intempéries ou les circonstances. Il faudra bien *cent millions* de ces récepteurs pour équiper l'Europe et préparer sa résistance.

Dans l'un ou l'autre cas d'ailleurs, le fait d'être prêt ne signifie pas faire preuve de pessimisme. Au contraire, c'est, montrant son bâton, que l'on évite d'être mordu par un chien. L'expérience contemporaine montre déjà que les gouvernements font « la politique de leur microminiaturisation » !

Au-delà des besoins militaires évidents, l'évolution de la *vie civile technique* implique elle aussi un accroissement permanent du champ d'applications de l'électro-

nique dans le sens de la multiplication des postes de faible encombrement. Citons par exemple : les besoins de la météorologie en émetteurs pour ballons ou fusées de sondage atmosphérique, l'immense appareillage d'intercommunications des P. et T. (centraux, mémoires, relais, satellites relais, commutations, etc.), le matériel d'organisation et de surveillance des transports (aéronautique, marine, radioguidages, téléphone et récepteurs portatifs, gares et triages S.N.C.F., organisation des rentrées ou des sorties des automobiles et circulation dirigée dans les agglomérations), la conduite des équipes de travail sur les grands chantiers (travaux publics, constructions navales, bâtiments, etc.), la multiplication des machines à surveiller et à contrôler disposées sur les chaînes industrielles et en fin de fabrication, et enfin la bioélectronique ou électronique médicale (prothèse auditive, examens cardiaques, gastriques, cervicaux, etc.). Ces besoins civils correspondent à une efficacité accrue du travail, à une meilleure qualité des produits, à un abaissement des prix de revient des travaux et des produits. A une certaine époque, des horlogers se sont amusés à microminiaturiser des pendules... Est-il possible de penser à ce que serait aujourd'hui l'efficacité de notre vie organisée... si chacun de nous n'avait pas sa montre ?

La microminiaturisation, outre une nécessité, s'impose aussi comme *un nouveau type de pensée*. Il faut, en effet, réfléchir que la panne classique d'un équipement conventionnel, où l'on remplace le composant défaillant, n'a plus son équivalent en microminiaturisation.

Ici, il n'y a qu'une solution possible... *ne pas avoir de pannes*. Le constructeur de matériel et l'utilisateur doivent donc avoir une confiance inébranlable dans le produit : on dit que ce dernier doit faire preuve de « fiabilité ». Nous avons dit que l'un des moyens de conserver une puissance raisonnable aux composants

microminiaturisés était d'employer des matériaux de *très haute qualité*. Ceci est l'aspect le plus probant de la « *fiabilité* ».

Pour essayer de chiffrer ce que représente ce néologisme, disons qu'un modèle de composant conventionnel est déclaré « fiable » si dans un prélèvement de *vingt pièces* par lot de fabrication, on n'observe pas plus de 1 déchet sur 20, après l'essai de durée (tension de service appliquée pendant 2.000 heures à 85°C par exemple).

Une pièce est bonne pour la microminiaturisation si le taux de déchet n'excède pas *un sur deux cents*, dans les mêmes conditions.

Il est donc incontestable que tout progrès technique réalisé en vue de la microminiaturisation, aura sa contre-partie bénéfique dans la qualité des composants conventionnels du même type. A titre d'exemple, il n'est pas improbable que d'ici deux ans, tous les *transistors HF* de faible puissances ne soient pas, même pour le grand public, du modèle actuellement étudié en vue de la microminiaturisation...

En définitive, microminiaturiser c'est faire plus petit certes, mais c'est aussi faire de *meilleure qualité*, avec des fonctions plus complexes, avec un choix plus grand de combinaisons, en faisant intervenir également les couplages et les interactions entre combinaisons....

— Pour savoir jusqu'où l'on peut aller dans ce domaine, certains chercheurs sont allés plus loin, dans deux voies différentes, mais qui se recoupent parfois.

Une école est celle « des physiciens des solides » qui appliquent les théories modernes de la constitution de la matière minérale à la recherche de nouvelles fonctions applicables à l'électronique : c'est l'école dite de « *l'électronique moléculaire* ».

La deuxième école est celle des « biologistes » qui appliquent les mêmes théo-

ries à l'explication du comportement des cellules vivantes (réactions en face du chaud et du froid, de la lumière, de la tension électrique, de la pression, des vibrations, transmission et emmagasinement des informations, etc.).

Ceci montre deux choses : d'abord que la microminiaturisation ne peut être déjà

considérée *comme une fin en soi, mais comme une simple étape* dans la marche du progrès technique, vers l'ultra petit; ceci montre enfin que les spécialistes de la microminiaturisation doivent *rester modestes*, très modestes... en face de ce que Dieu a su réaliser avant eux, en face de la structure des êtres vivants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Onde Electrique, n° 428 de Novembre 1962.

- (1) Microminiaturisation électronique, A. BOBENRIETH, pp. 929 à 944.
- (2) Le Micromodule, R. COCHAIN et J. SCHWEITZER, pp. 921 à 928.
- (3) Les circuits intégrés, J. BLANLUET, pp. 957 à 962.

Le Président de la Société, Directeur-Gérant : J. LECOMTE.

D.P. n° 1080

IMPRIMERIE COOPÉRATIVE. — ARPAJON (S.-et-O.)

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

15, Quai Anatole-France - PARIS-7^e

C. C. P. Paris 9061-11

Tél. : SOLférino 93-39



Colloques Internationaux

N° 108

MÉCANIQUE DE LA TURBULENCE

M A R S E I L L E

28 août - 2 septembre 1961

Volume relié pelliior, in-4° coquille, comportant 472 pages et 4 planches hors-texte

Prix : 60 F.



Oxygène, azote, hydrogène,
comprimés et liquides.
Argon, gaz rares extraits de l'air.
Gaz spéciaux et
mélanges de gaz.
Propane. Ammoniac.
Acétylène dissous.
Soudage, oxycoupage,
toutes techniques connexes.
Appareils de séparation
de tous mélanges gazeux
par liquéfaction et rectification.
Péroxyde d'hydrogène (eau oxygénée)
Perborate de soude.
Bromite de soude.
Chlorite de soude.
Persulfates d'ammonium et de potassium.
Polyéthylènes haute et basse pressions.

Pub.AL

L'AIR LIQUIDE
75, QUAI D'ORSAY PARIS 7^e INV. 44-30

PLUS DE
200 USINES
DANS LE MONDE

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 BATIMENTS

BARRAGES - USINES HYDRO-ELECTRIQUES ET THERMIQUES
USINES, ATELIERS ET BATIMENTS INDUSTRIELS
TRAVAUX MARITIMES ET FLUVIAUX
AEROPORTS - OUVRAGES D'ART
ROUTES - CHEMINS DE FER
CITES OUVRIERES - EDIFICES PUBLICS ET PARTICULIERS
ASSAINISSEMENT DES VILLES - ADDUCTIONS D'EAU
BUREAUX D'ETUDES

CENTRALES ELECTRIQUES
GRANDS POSTES DE TRANSFORMATION
LIGNES DE TRANSPORT DE FORCE
ELECTRIFICATION DE VOIES FERREES
ELECTRIFICATIONS RURALES
EQUIPEMENTS ELECTRIQUES INDUSTRIELS

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 - CONSTRUCTION D'USINES

HYDROGÈNE

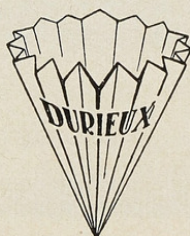
GAZ DE VILLE - GAZ DE SYNTHÈSE

AMMONIAQUE

ACIDE NITRIQUE

ENGRAIS AZOTÉS

LES FILTRES DURIEUX



PAPIER A FILTRER

En disques, en filtres plissés, en feuilles 52x52

SPECIALITÉS :

FILTRES SANS CENDRES

N° 111, 112 et Crêpé N° 113 extra-rapide

Filtres Durcis n° 128 & Durcis sans cendres n° 114

Cartouches pour extracteurs de tous systèmes

PAPIER "CRÊPÉ DURIEUX"

Toutes Dimensions, pour Filtres-Presses. (Envoi d'échantillons sur demande)

Registre du Comm. de la Seine N° 722.521-2-3

Téléphone : ARCHIVES 03-51

MÉDAILLE D'OR de Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale (Juillet 1918)

20, rue Malher, PARIS (4^e)



Demandez le Catalogue donnant toutes les explications sur les emplois de mes différentes sortes



PEUGEOT

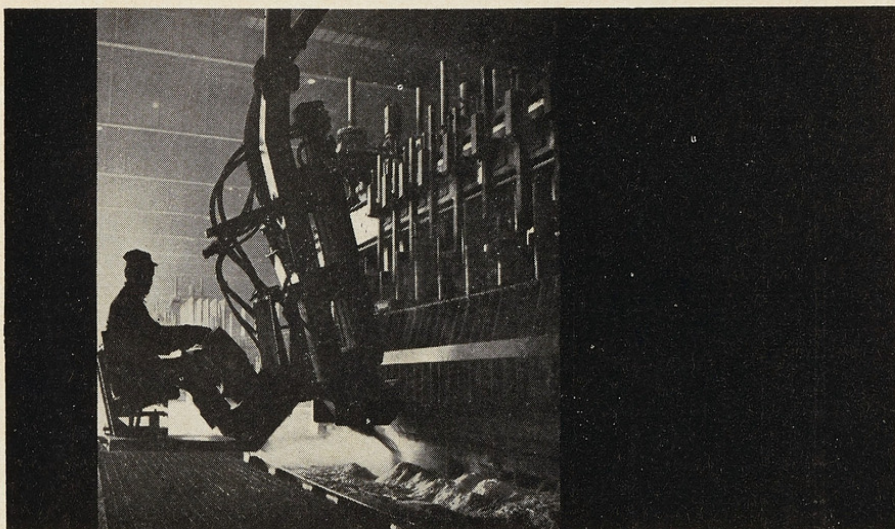
403 • 404

0.193.



C'est en grande part grâce à la qualité de ses techniques que Pechiney compte aujourd'hui parmi les grandes entreprises qui concourent à l'expansion économique nationale.

Premier producteur européen d'aluminium, (plus de 80 % de la production française sort de ses usines), Pechiney a également orienté ses recherches vers la mise au point de toute une série de métaux et alliages spéciaux à hautes performances, particulièrement adaptés aux problèmes que posent les réalisations les plus récentes d'industries d'avant-garde comme l'aéronautique, l'électronique et l'industrie nucléaire.



Parmi ces métaux dont il y a quelques années on ne connaissait guère que les noms, on trouve non seulement le béryllium, le niobium et le tantale, mais encore le titane, le zirconium et le gallium.

Aux réalisations atomiques françaises, Pechiney apporte un concours efficace notamment par la fourniture de graphite de haute pureté pour réacteurs nucléaires.

Enfin, la longue expérience de Pechiney dans le domaine de l'électrothermie et de l'électrometallurgie lui a permis le développement de nombreux autres produits indispensables aux industries de transformation les plus diverses.

Cette expérience, alliée à une grande faculté d'adaptation aux problèmes nouveaux et à de puissants moyens de recherches, explique la place occupée par Pechiney au rang des grandes entreprises françaises.

PECHINEY

23, RUE BALZAC, PARIS 8° - CAR. 54-72

SOCIÉTÉ D'ÉLECTRO-CHIMIE
D'ÉLECTRO - MÉTALLURGIE
ET DES
ACIÉRIES ÉLECTRIQUES D'UGINE

ACIERS
PRODUITS CHIMIQUES
ALUMINIUM
MAGNÉSIUM
FERRO-ALLIAGES
ÉTAIN

SIÈGE SOCIAL : 10, RUE DU GÉNÉRAL-FOY - PARIS (8°)
TÉLÉPHONE : EUROPE 31-00
ADRESSE TÉLÉGRAPHIQUE : TROCHIM PARIS

E N T R E P R I S E S

BOUSSIRON

10, Boulevard des Batignolles, PARIS-17°
ALGER - CASABLANCA

S. E. T. A. O. à ABIDJAN (Côte d'Ivoire)

TRAVAUX PUBLICS
BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAIT
CONSTRUCTIONS INDUSTRIELLES

SOMMAIRE ET RÉSUMÉS DES ARTICLES

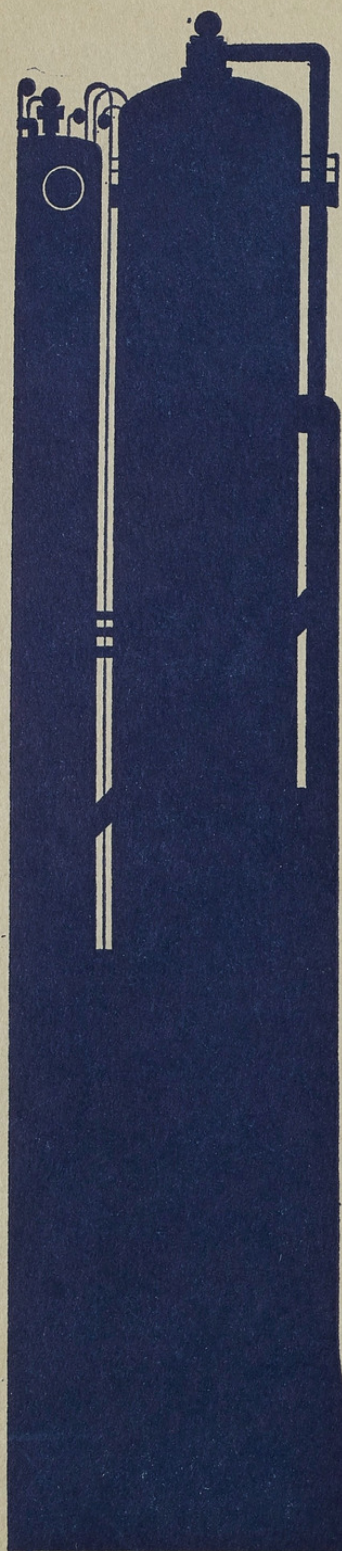
LA MICROMINIATURISATION DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES

par M. Jean PEYSSOU

(Suite de la page 2 de la couverture)

- La famille des assemblages composites de composants séparés, ou technique dite des « micromodules ». Chaque composant est ici une réduction d'un composant classique. Toutefois la réduction des dimensions et les problèmes d'empilement en ensembles fonctionnels appelés « modules » créent de nouveaux problèmes, tant au point de vue circuit, qu'au point de vue technologie et économie des procédés de fabrication. Néanmoins l'industrialisation peut s'envisager avec le moins de surprises à craindre.
- La famille des circuits « évaporés ». Dans ces circuits, on évapore sous vide, sur un support rigide, des matériaux conducteurs, semi-conducteurs, résistants ou isolants, dont la combinaison permet de réaliser des ensembles de transistors, diodes, capacités, résistances et conducteurs. Ces ensembles sont à structure plate et principalement utilisables dans les fonctions logiques (calculateurs). Le problème crucial actuel est celui des connexions entre circuits.
- La famille des circuits dits « intégrés », dans lesquels les précédentes fonctions sont toutes réalisées à partir d'un monocristal semi-conducteur, que la nature des « doppages » et leur arrangement permettent de transformer en une juxtaposition de fonctions actives ou passives. Ces circuits sont aussi facilement utilisables dans les fonctions « logiques ».

Le problème actuel des techniciens et des industriels est de savoir s'il est indispensable de pousser à fond une seule voie au détriment des deux autres, ou bien si les trois méthodes doivent être menées de front et en combinaison.



ÉTABLISSEMENTS
KUHLMANN

SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 197.888.550 F

25, BOULEVARD DE L'AMIRAL BRUX - PARIS (XVI^e)

TÉL : KLEBER 50-50 + • KLEBER 50-10 +
TELEX : ETAKUHLM - PARIS 27.640



**PRODUITS CHIMIQUES
INDUSTRIELS ET AGRICOLES**



PRODUITS ORGANIQUES



**RÉSINES ET MATIÈRES
PLASTIQUES**



TEXTILES ARTIFICIELS



IK 3

Alprov.